

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI

“ FEDERICO II ”



FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI MATERIALI E DELLA PRODUZIONE

Tesi di Dottorato

Dottorato di Ricerca in Tecnologie e Sistemi di Produzione XXI Ciclo

Sviluppo di un impianto automatico di saldatura

Ing. Emanuele SARNO

Tutor: Prof. L.Nele

ANNO ACCADEMICO 2007/2008

SOMMARIO

PREMESSA.....	11
1. LA SALDATURA AD ARCO IN ATMOSFERA GASSOSA : G.M.A.W.....	15
1.1. Descrizione.....	15
1.2. L'arco elettrico.....	17
1.3. Generatori di corrente.....	25
1.4. Meccanismo di accensione.....	26
1.5. Funzionamento.....	30
1.6. Meccanismi da trasferimento del metallo d'apporto.....	35
1.6.1. Short arc.....	36
1.6.2. Globular arc.....	39
1.6.3. Sprayarc.....	42
2. ESAME DEI PARAMETRI DI SALDATURA E STUDIO DELLA LORO INFLUENZA.....	50
2.1 Parametri di saldatura.....	50
2.1.1. Corrente di saldatura.....	52
2.1.2. Polarità.....	57
2.1.3. Tensione d'arco -lunghezza d'arco.....	58
2.1.4. Velocità di spostamento della torcia di saldatura	63
2.1.5. Sporgenza libera o stick-out.....	64
2.1.6. Posizione della torcia rispetto all'asse di saldatura	65
2.1.7. Posizione del giunto di saldatura.....	68
2.1.8. Diametro dell'elettrodo.....	71

2.1.9. Punto di collegamento del morsetto di massa.....	71
2.2. Equipaggiamento.....	72
2.2.1. Torcia di saldatura.....	73
2.2.2. Gruppo di alimentazione del filo.....	78
2.2.3. Centralina di controllo.....	80
2.2.4. Generatore di corrente.....	84
2.2.5. Riduttore di pressione e contenitore del gas di pressione.....	97
2.2.6 Elettrodo.....	98
2.3. Materiali di consumo.....	98
2.3.1. Fili – elettrodi.....	99
2.4. I gas di protezione.....	102
2.4.1. Introduzione.....	102
2.4.2. Scelta della miscela di protezione.....	106
2.4.3. Proprietà chimico – fisiche.....	108
2.4.4. Argon.....	113
2.4.5. Elio.....	116
2.4.6. Miscele Argon – Elio.....	121
2.4.7. Anidride Carbonica.....	122
2.4.8. Ossigeno.....	125
2.4.9. Idrogeno.....	127
2.4.10. Azoto.....	128
2.4.11. Miscele binarie.....	129
2.4.12. Miscele ternarie.....	134
2.4.13. Miscele quaternarie.....	136
2.5. Difetti di saldatura.....	140
2.5.1. Infragilimento da Idrogeno.....	140
2.5.2. Contaminazione da Ossigeno o Azoto.....	141
2.5.3. Pulizia.....	141

2.5.4. Fusione incompleta.....	142
--------------------------------	-----

3.0 AUTOMAZIONE DEL PROCESSO.....143

3.1 – Premessa.....	147
3.2 – L’ impianto di saldatura.....	148
3.2.1 – Il generatore di corrente ad inverter Miller da 565A.....	150
3.2.2 – Il gruppo di trascinamento del filo Miller modello S-64M.....	153
3.2.3 – La torcia	156
3.2.4 – Il sistema di avanzamento della torcia della FRO.....	158
3.2.5 – L’ulteriore sistema motorizzato di movimentazione della torcia.....	160
3.2.6 – Il sensore di tensione.....	164
3.2.7 – Il sensore di corrente.....	166
3.2.8 – Il sensore di velocità del filo.....	168
3.2.9 – Il sensore di velocità della torcia lungo l’asse longitudinale.....	169
3.2.10–Il miscelatore di gas con misura di portata.....	171
3.2.11 – La scheda di acquisizione dati	173
3.2.12 – La centralina di controllo gestita da PC.....	174
3.3 – Il sistema di visione.....	180
3.3.1 – Le videocamere.....	180
3.3.1.1 – La videocamera GUPPY F-033C.....	185
3.3.2 – Il sistema di illuminazione.....	188
3.3.3 – L’alimentatore del sistema di illuminazione.....	193
3.3.4 – Posizionamento della telecamera e del sistema di illuminazione.....	197
3.4 – Protezione dai fumi di saldatura.....	198

4.0	TEORIA DELLA VISIONE ARTIFICIALE.....	200
4.1	Premessa.....	200
4.2	Campi di utilizzo dei sistemi di visione.....	200
4.3	– Problemi relativi ai sistemi di visione.....	203
4.4	– Lo sviluppo della visione artificiale.....	204
4.4.1	– L’approccio teorico.....	204
4.4.2	– L’approccio tecnologico.....	206
4.5	– Confronto con il sistema semiautomatico ABW.....	209
4.5.1	– Principi di funzionamento del sistema ABW.....	210
4.5.2	– Il programma.....	211
4.5.3	– Il programma adattativo della velocità.....	213
4.5.4	– Il programma adattativo della corrente.....	213
4.5.5	– Il programma adattativo della posizione delle passate.....	214
4.6	– La visione computazionale.....	215
4.7	– I tre approcci alla visione artificiale.....	217
4.7.1	– L’approccio gerarchico.....	222
4.7.1.1	– Shape from shading.....	223
4.7.1.2	– Shape from contour.....	224
4.7.1.3	– Shape from texture.....	224
4.7.1.4	– Shape from shape.....	224
4.7.1.5	– Shape from motion.....	225
4.7.1.6	– Shape from stereo.....	225
4.7.1.7	– Metodo delle immagini intrinseche.....	227
4.7.1.8	– La segmentazione.....	227
4.7.3	– La visione attiva.....	228
4.7.4	– Routines visuali.....	230
4.8	– Tecniche di analisi dell’immagine.....	230

4.8.1 – Tecniche di elaborazione di basso livello.....	233
4.8.2 – Tecniche di elaborazione di medio livello.....	234
4.8.3 – Tecniche di elaborazione di alto livello.....	234
4.9 – La visione umana.....	235
4.9.1 – Parallasse binoculare.....	235
4.9.2 – Parallasse monoculare da moto.....	235
4.10 – Analogie tra la visione artificiale e la visione umana.....	236
5.0 ANALISI DELL’IMMAGINE.....	237
5.1 – Introduzione.....	237
5.2 – La formazione dell’immagine.....	237
5.3 – Le lenti sottili.....	240
5.4 – La fotometria.....	243
5.5 – La riflessione speculare.....	245
5.6 – Le immagini digitali.....	246
5.7 – Geometria e notazione.....	248
5.7.1 – Il modello della telecamera.....	248
5.7.2 – Un modello semplificato.....	249
5.7.3 – Il modello generale.....	251
5.8 – Geometria epipolare.....	260
5.8.1 – Matrice fondamentale.....	262
5.8.2 – Disegno delle rette epipolari.....	264
5.8.3 – Rettificazione epipolare.....	265
5.9 – La calibrazione.....	266
5.9.1 – La ricostruzione precalibrata.....	267
5.9.2 – La calibrazione on line.....	268
5.10 - Il metodo di Harris e Stephens.....	270

5.11 – Estrazione dei parametri	274
5.11.1 – Studio della PPM.....	275
5.11.2 – Metodo lineare 1.....	276
5.11.3 – Metodo lineare 2.....	277
5.11.4 – Metodo non lineare.....	278
5.12 – Analisi dell’immagine.....	278
5.12,1 – Gli istogrammi.....	279
5.12.2 – Ricerca dei confini di un oggetto	281
5.12.3 – La trasformata di Hough.....	282
5.12.4 – La segmentazione.....	283
5.12.4.1 – L’algoritmo <i>thresholding</i>	284
5.12.4.2 – L’algoritmo split and merge.....	286
5.12.4.3 – L’algoritmo region growing.....	287
5.12.4.4 – L’algoritmo simultaneous region growing.....	289
5.12.5 – L’ edge detection.....	289
5.12.6 – Operatori morfologici.....	293
5.12.6.1 – L’operatore <i>dilation</i>	295
5.12.6.2 – L’operatore <i>erosion</i>	296
5.13 – Sistemi lineari e filtri.....	299
5.13.1 – Filtri lineari.....	301
5.13.2 – Smoothing filter.....	303
5.13.3 – Mean filter.....	304
5.13.4 – Il filtro mediano.....	305
5.13.5 – Filtro gaussiano.....	306
5.13.6 – Size filter.....	307
5.14 – Misura dell’informazione di un template.....	308
5.14.1 – Tracking.....	309

5.14.2 –L’algoritmo di Tomasi-Kanade per il problema della corrispondenza...	312
5.14.3– La distanza.....	313

6.0 TECNICHE DI CONTROLLO NELLA SALDATURA PER FUSIONE

6.1 – Introduzione.....	315
6.1.1 – La localizzazione del giunto attraverso lo studio dello spettro della luce emessa da una saldatura ad arco MIG.....	315
6.1.2 – Lo studio di un sistema di tracciamento del giunto per una saldatura ad arco robotizzata.....	318
6.1.3 – Sistema di saldatura robotica per un processo S.M.A.W.....	324
6.1.4 – Studio su sensori di visione per il rilevamento del giunto di saldatura Per pezzi ad altezza variabile.....	331
6.1.5 – Rilevamento e posizionamento del giunto per una saldatura a fascio Elettronico.....	344
6.1.6 – Ispezione del gap ed allineamento utilizzando una tecnica di visione Per la saldatura laser di giunti di testa.....	348
6.1.7 - Un sistema di percezione ottico per il rilevamento del giunto ed il controllo del bagno di saldatura nella saldatura GMAW di tubi di acciaio.....	358
6.1.8 - Inseguimento automatico per un robot di saldatura per giunture di forme libere con l’utilizzo di un sistema di visione laser.....	368

7.0 SISTEMA DI VISIONE

7.1 Software.....	381
7.2 Tool.....	382
7.3 Manipolazione dell’immagine.....	384
7.4 Immagini binarie.....	386

7.5 Istogrammi.....	386
7.6 Filtri.....	388
7.7 Contrasto e luminosità.....	389
7.8 Binary Basic Morphology.....	390
7.9 Binary Advanced Morphology.....	392
7.10 Calibrazione.....	394
7.11 Misura delle dimensioni delle piastre affiancate.....	398
7.12 Osservazioni.....	401
7.13 Robustezza alla rotazione.....	402
7.14 Azionamento motori.....	404
7.15 Illuminazione.....	404
7.16 Videocamere.....	407
7.17 Risoluzione ottica.....	409
7.18 Profondità di colore.....	409
7.19 Smart-camera.....	409
7.20 Posizionamento della webcam.....	411
7.21 Ricerca e posizionamento piastre.....	411
7.22 Ricerca e posizionamento del gap.....	413
7.23 Comunicazioni integrate.....	413
7.24 Il software di riconoscimento del giunto.....	415
7.24.1 – Il SEAM TRACKER	422
– Home	425
– Pre-Processor	427
– Analysis	431
– Post-Processor.....	434
7.25 Le Tecniche di Luce Strutturata per il rilevamento tridimensional.....	437
7.25.1. Proiezione di un reticolo.....	439
7.25.2 Il sistema di Visione.....	440

7.25.3	Ambienti di lavoro software e metodica di utilizzo.....	449
7.25.4	Analisi dell' immagine	451
7.25.5	Valutazione errore lettura cianfrino.....	455
7.25.6	Determinazione della geometria reale del cianfrino.....	461
7.25.7	Seam Tracker 2008.....	463
7.25.8	Il sistema di controllo dei parametri.....	464
7.26	Sviluppo del sistema automatico di saldatura GMA.....	465
7.27	Progetto di una rete neuro-fuzzy per la predizione dell'apporto termico specifico al bagno fuso.....	465
	Conclusioni.....	475
	Bibliografia.....	477

INTRODUZIONE

Il progetto di ricerca che ci si è proposti di svolgere è improntato sullo studio delle tecnologie di giunzione tra materiali tradizionali ed in particolare sulla saldatura ad arco di acciai e leghe di alluminio.

Tale lavoro è anche finalizzato alla completa automazione del processo G.M.A.W. a mezzo di un impianto sperimentale allestito presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell' Università di Napoli Federico II

Come visibile anche dal diagramma di Gantt di figura 1, lo stato evolutivo dell'impianto di saldatura realizzato, può essere riassunto dai seguenti punti:

1. E' stato allestito un sistema multi processo di saldatura ad arco sotto protezione di gas.
2. L'impianto è stato così completamente strumentato per il monitoraggio e la registrazione dei seguenti parametri di processo:
 - Corrente di saldatura
 - Tensione di saldatura
 - Velocità di avanzamento della torcia
 - Velocità di alimentazione del filo

- Portata di gas di protezione
3. Si è inoltre realizzato un movimento della torcia di saldatura su tre assi sia manuale che gestito via software.
 4. Si è effettuato uno studio preliminare sulla possibilità di realizzare un controllo automatico basato sull'acquisizione di informazioni sul giunto a mezzo di telecamera. Il tutto può essere riassunto dai seguenti punti:

- Nell'ottica di verificare, in via preliminare, la fattibilità delle operazioni a cui si è pensato si è dotato di una telecamera USB di fascia bassa. Lo strumento preso in esame è una *web cam* del tipo usato per la video conferenza con risoluzione di 640x480 punti.

- È stato sperimentato un algoritmo di manipolazione dell'immagine per effettuare la localizzazione, in automatico, dei particolari da giuntare sul piano di lavoro. Il programma realizzato è in grado di leggere la posizione dei provini da saldare dall'immagine della *web cam* e di posizionare la torcia in corrispondenza del punto di inizio saldatura.

- È stato sperimentato un algoritmo di manipolazione dell'immagine per effettuare l'inseguimento del giunto di saldatura. Il programma è capace di riconoscere il cianfrino e di misurarne il gap.

Il primo anno di sperimentazione ha confermato quindi la possibilità di realizzare un sistema di inseguimento del giunto tramite telecamera.

Problemi di compatibilità e di prestazioni della *web cam* hanno contribuito alla scelta di un prodotto industriale di fascia superiore. Si è deciso di installare una

telecamera CCD di tipo industriale, scelta giustificata dai risultati fino ad allora ottenuti.

Nei paragrafi successivi viene descritta l'attività di ricerca svolta nel secondo anno di lavoro. Verranno descritti i risultati già ottenuti ed il lavoro ancora in corso sui seguenti punti dell'attività di ricerca:

1. Sviluppo del sistema di visione per l'inseguimento del giunto di saldatura e per la misura del gap.
2. Costruzione del data base di esperimenti per l'addestramento di sistemi decisionali esperti neuro-fuzzy.
3. Prove preliminari di sviluppo del controllo adattivo basato su rete neuro-fuzzy.

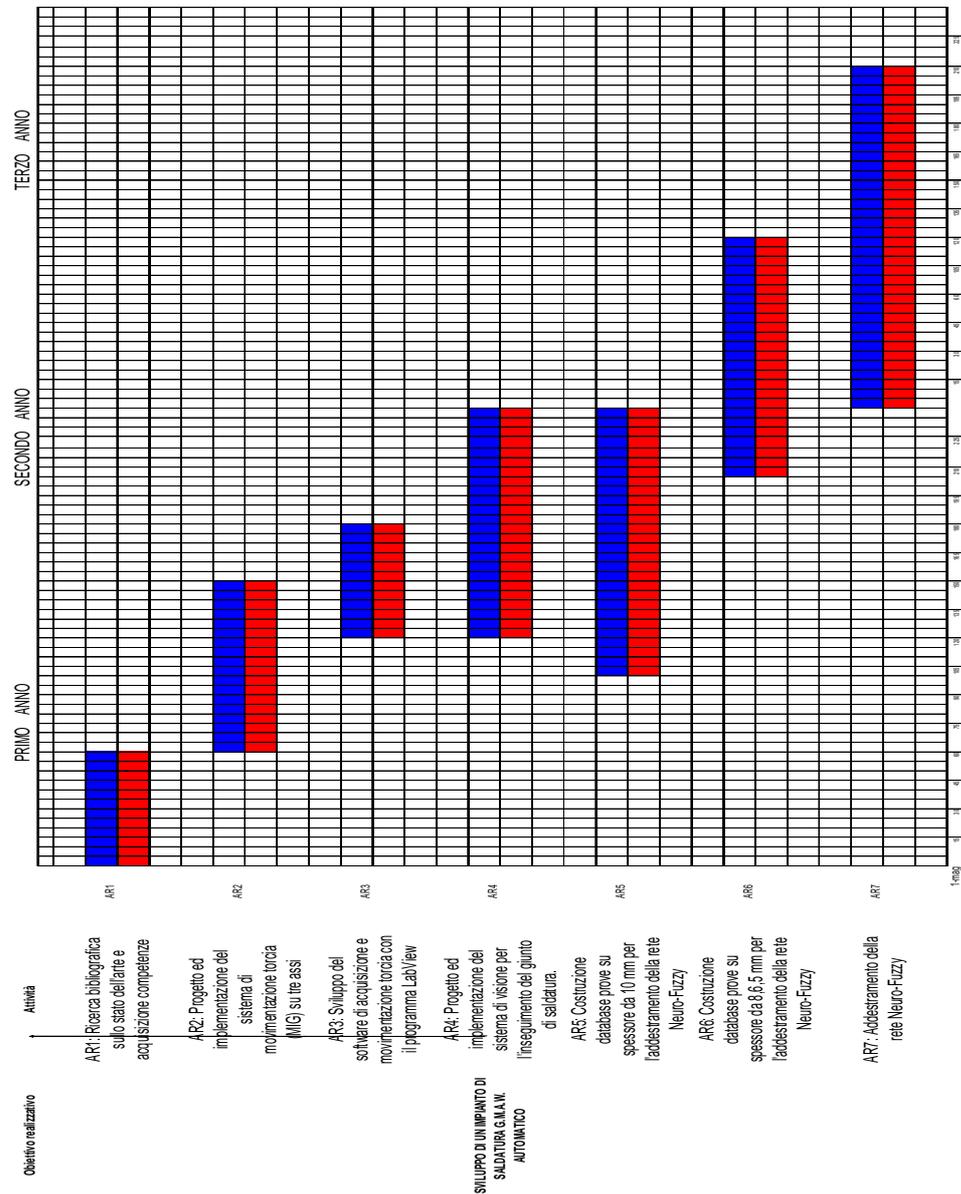


Figura 1- diagramma di Gantt delle attività -

1. LA SALDATURA AD ARCO IN ATMOSFERA GASSOSA:

G.M.A.W.

1.1 DESCRIZIONE

Uno dei procedimenti di saldatura più diffusi é costituito dal sistema G.M.A.W. - Gas Metal Arc Welding - in italiano detto filo continuo. Tale procedimento si realizza attraverso l'utilizzo di un impianto di saldatura, che nella sua versione più semplice é costituito da:

- un generatore di corrente a tensione costante
- un alimentatore di filo a velocità costante
- una torcia di alimentazione filo nel bagno di fusione
- una bombola contenente il gas di protezione

E' un classico impianto a filo continuo e può essere utilizzato sia nella versione manuale che automatica.

Un processo di saldatura G.M.A. W. si può effettuare nelle modalità:

- Short arc
- Globular arc
- Spray arc
- Arco pulsato

ognuna delle quali presenta particolari caratteristiche.

Attualmente il procedimento di saldatura con il quale si possono ottenere le più alte produttività è l'arco sommerso. Tale metodo consiste nell'accostare i lembi da saldare, posizionarli, ricoprire la zona da saldare con un flusso di materiale che servirà per fornire l'atmosfera di protezione e per fornire altri elementi di lega talvolta necessari e infine innescare l'arco elettrico tra un elettrodo, che altro non è che il filo di materiale di apporto e il metallo base. Tale arco si troverà nella zona ricoperta di flusso e per questo si parla di arco sommerso. Come può facilmente comprendersi un tale metodo risulta avere notevoli limitazioni in quanto, oltre a poter effettuare solo saldature in piano, necessita di elevati tempi di preparazione dei pezzi, il che ne giustifica l'utilizzo solo in caso di saldature di pezzi di notevoli dimensioni. Inoltre le dimensioni dell'impianto non ne permettono il trasporto e i suoi costi raggiungono facilmente i cinquantamila euro. Da tutto ciò può facilmente comprendersi quanto possa essere conveniente la messa a punto di un procedimento di saldatura G.M.A. W. ad alta produttività, che tenda cioè ad avvicinarsi ai limiti dell'arco sommerso, essendo in tal caso l'impianto facilmente trasportabile e di costo totale di circa quindicimila euro. Recentemente è stato messo a punto un procedimento di saldatura chiamato T.I.M.E. Process, in grado di saldare con elevate produttività. E' sostanzialmente un procedimento G.M.A.W. che utilizza un diverso set di parametri di saldatura, una tensione d'arco maggiore, una diversa miscela di protezione, una particolare torcia. Sarà a tale processo che noi cercheremo di tendere mantenendoci sempre nell'ottica del "Low Cost".

1.2 L'ARCO ELETTRICO

Il processo G.M.A.W. sfrutta il calore generato da un arco voltaico che si instaura tra l'estremità di un elettrodo costituito da un filo continuo ed il metallo base. L'elettrodo viene alimentato continuamente nella zona di fusione da un alimentatore di filo attraverso la torcia di saldatura. Lo spostamento della torcia può essere sia manuale che automatico. Si adoperano generalmente correnti che variano dai 150 ai 600 A e tensioni che variano dai 20 ai 35 V. Il T.I.M.E. utilizza invece tensioni più alte, in genere nell'ordine dei 40-45 V. Per comprendere bene il meccanismo mediante il quale avviene la saldatura dobbiamo chiarire cosa si intende per arco elettrico e la fisica del fenomeno. L'arco elettrico è la manifestazione fisica del passaggio di corrente attraverso un mezzo gassoso ionizzato.

Consideriamo due elettrodi fusibili o infusibili posti in aria (gas non ionizzato) ad una distanza δ tra loro (nel caso del GMA W, gli elettrodi sono fusibili e sono costituiti uno dal metallo base, metallo costituente gli elementi da saldare e l'altro dal metallo d'apporto, cioè dal filo continuo); in condizioni normali, se vogliamo che tra essi ci sia un arco elettrico e quindi un passaggio di corrente nel mezzo gassoso tra essi interposto, dobbiamo collegarli ad una sorgente di forza elettromotrice e fornire una tensione molto elevata, dell'ordine di 3000 Volt per ogni mm di distanza. Sotto queste condizioni gli elettroni degli atomi costituenti il catodo (polo negativo) riescono ad allontanarsi ed essere accelerati verso l'anodo (polo positivo).

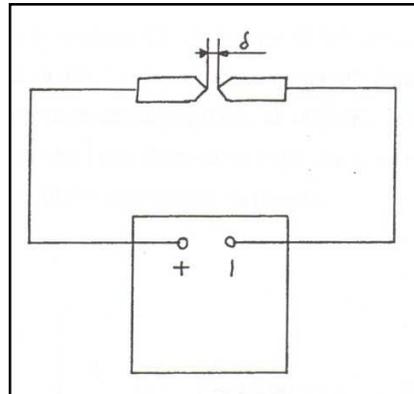


Fig. 1.1 : Schema di due elettrodi collegati ad un generatore di corrente.

Nel loro cammino dal catodo all'anodo, tali elettroni urtano violentemente gli atomi costituenti l'aria, ionizzandoli e formando altre particelle cariche che vengono accelerate verso l'elettrodo di segno opposto e che contribuiranno alle successive ionizzazioni. Tale ionizzazione avviene generando una forte quantità di calore ed una intensa luminosità. Si ha così la formazione dell'arco elettrico la cui continuità è assicurata dalla continua applicazione della tensione elettrica fra gli elettrodi in questione e dal forte sviluppo di calore, che favorisce la ionizzazione del gas interposto fra gli elettrodi.

Sfruttando "l'effetto termoionico" dei materiali, cioè la capacità di emettere spontaneamente elettroni se portati ad elevate temperature, si riesce ad ottenere lo stesso fenomeno sotto una differenza di potenziale di poche decine di volt (25 ÷ 40 Volt). Quindi, mediante l'innalzamento della temperatura del catodo e l'applicazione di una tensione relativamente bassa tra gli elettrodi, si riesce ad innescare l'arco.

L'innalzamento della temperatura del catodo si può ottenere in diversi modi, il più semplice dei quali è quello di cortocircuitare gli elettrodi (ottenendo così un innalzamento della temperatura per effetto Joule) e successivamente allontanarli ponendoli ad una distanza opportuna. L'arco elettrico è caratterizzato da due zone: il "fuso" e "l'aureola" (Fig.1.2). Il fuso, detto così per la sua forma, è la zona centrale luminosissima dove si hanno altissime temperature anche superiori ai 6000 K; esso costituisce una sorta di ponte conduttore tra i due elettrodi ed è qui che si ha l'effettivo passaggio di elettroni. Il fuso è costituito interamente da plasma.

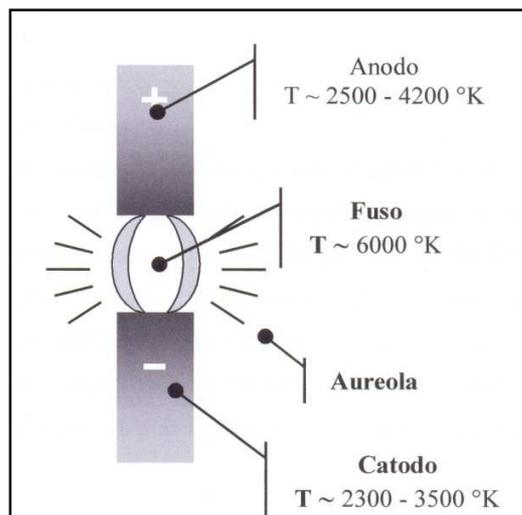


Fig. 2.2 : Zone caratteristiche del fuso e dell'aureola.

L'aureola è la zona esterna dell'arco costituita da particelle solide e/o gassose ad alta temperatura o in combustione; anche questa zona è molto luminosa anche se in modo minore rispetto alla precedente.....

La luminosità dell'arco, emettendo raggi ultravioletti ed infrarossi, é nociva principalmente per la vista ed é quindi necessario proteggersi con opportuni filtri visivi.

Come detto, nel fuso si possono raggiungere temperature dell'ordine dei 6000K; sull'anodo e sul catodo si raggiungono, invece, temperature inferiori e dipendenti dal materiale degli elettrodi:

anodo (polo positivo) $T_{\text{anodo}} = 2500 \div 4200\text{K}$

catodo (polo negativo) $T_{\text{catodo}} = 2300 \div 3500\text{K}$

In ogni caso la temperatura del catodo è minore di quella dell'anodo. L'arco elettrico può essere visto come un elemento di un circuito elettrico costituito da un generatore di corrente, da conduttori e dall'arco stesso.

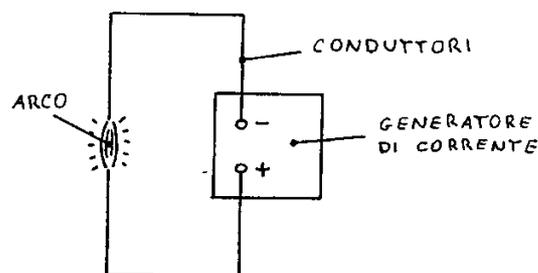


Fig. 1.3 : schema di un circuito contenente un arco elettrico.

Tale elemento ha però delle particolari caratteristiche:

- a) non é costituito da un mezzo solido;
- b) ha una resistenza generalmente variabile con la corrente di alimentazione.

Per quanto riguarda il 2° punto ricordiamo che un generico conduttore ha una resistenza espressa da:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s}$$

dove:

ρ é la resistività del conduttore

l é la lunghezza

s é la sezione trasversale

Per l'arco elettrico vale ancora la stessa relazione dove: ρ è la resistività dell'arco, dipendente dalla facilità con cui il gas presente tra gli elettrodi è ionizzabile; l è la lunghezza dell'arco ed s è la sezione trasversale dell'arco.

In questo caso però, all'aumentare della corrente, si hanno i seguenti fenomeni:

1. aumenta la sezione trasversale dell'arco, S
2. aumenta la temperatura e di conseguenza aumenta anche la percentuale di particelle ionizzate con una conseguente diminuzione della resistività.

Complessivamente a parità di l , all'aumentare della corrente I , si avrà una forte diminuzione della resistenza R , tale che il prodotto IR sarà decrescente all'aumentare della corrente. Ricordiamo che $IR = V =$ tensione d'arco e quindi all'aumentare della corrente si avrà una diminuzione della tensione d'arco. Il fenomeno della "dilatazione della sezione trasversale" va avanti finché non si arriva ad una condizione di saturazione in corrispondenza della quale tutto il gas interposto tra gli elettrodi è ionizzato e quindi la resistività avrà raggiunto il suo valore minimo. Dopo la saturazione la resistenza dell'arco si mantiene praticamente costante a parità di I e la legge che lega la tensione alla corrente segue la legge di Ohm (la tensione sarà crescente con la corrente), Fig 1.4.

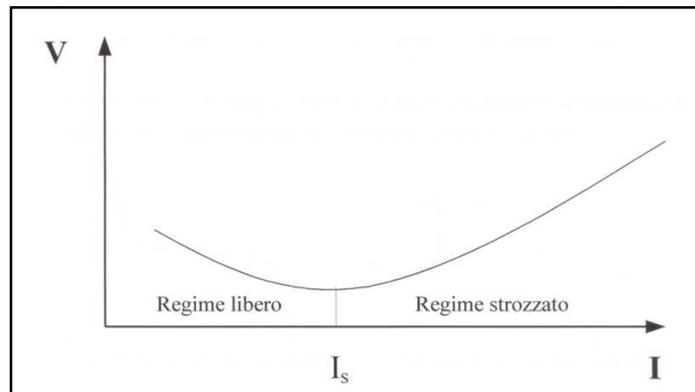


Fig. 1.4: Caratteristica interna, relazione tra tensione e corrente d'arco.

La corrente di saturazione I_s è definita come il punto di separazione tra il tratto discendente e quello ascendente ed è tanto minore quanto più piccolo è il diametro dell'elettrodo. Nel tratto discendente l'arco è definito in "regime libero", mentre in quello ascendente è in "regime strozzato".

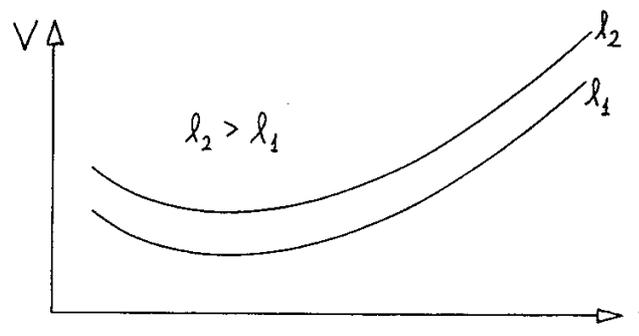


Fig. 1.5 : Variazione della caratteristica interna all 'aumentare della lunghezza d'arco (l).

Sia il procedimento G.M.A. W. che l'arco sommerso, adottando correnti elevate, lavorano sul tratto ascendente della curva e quindi in regime strozzato, mentre i procedimenti che utilizzano basse densità di corrente, come la saldatura manuale ad elettrodi rivestiti, lavorano in regime libero.

Le temperature che si riescono a raggiungere nell'arco sono:

- 5000°C quando l'arco é in regime libero.
- 6000°C quando siamo vicini alla saturazione.
- 7000°C quando l'arco é in regime strozzato.

La curva che lega la tensione d'arco alla corrente d'arco é detta "caratteristica interna" o "caratteristica statica d'arco" o ancora "caratteristica Volt-Ampere" e rappresenta tutti i punti in corrispondenza dei quali l'arco può funzionare. Una generica rappresentazione é mostrata in Fig 1.4.

Ovviamente , all'aumentare della lunghezza dell'arco, la resistenza d'arco aumenterà e quindi la curva volt-ampere si sposterà verso l'alto (essendo $V=IR$, a parità di L , aumentando R aumenterà anche V), vedi Fig 1.5.

1.3 GENERATORI DI CORRENTE

Sono le macchine che generano la differenza di potenziale necessaria all'accensione dell' arco. Ogni generatore, indipendentemente dal proprio principio di funzionamento, è contraddistinto da una particolare relazione che intercorre tra la d.d.p. misurabile ai suoi morsetti e la corrente che emette in corrispondenza di quella particolare d.d.p. Tale relazione prende il nome di "caratteristica esterna del generatore" ed è proprio in funzione di tale relazione che il generatore viene scelto. L'importanza di tale relazione sta nel fatto che, conoscendo la caratteristica interna dell' arco e la caratteristica esterna del generatore, il punto di funzionamento può essere determinato mediante sovrapposizione dei due diagrammi nello stesso piano..... .

I generatori più interessanti nelle applicazioni delle quali ci occuperemo sono quelli a tensione cadente e quelli a tensione costante aventi curve caratteristiche come in figura.

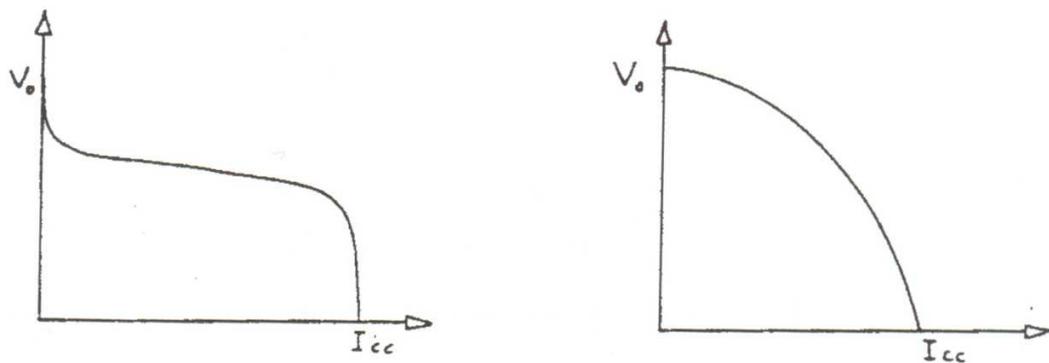


Fig. 1.6 :Caratteristiche esterne a tensione costante e cadente.

1.4 MECCANISMO DI ACCENSIONE

Nel descrivere il meccanismo di accensione dell' arco si preferisce far riferimento ad un processo di saldatura ad elettrodo rivestito, dato che tale sistema di saldatura è più diffuso e conosciuto del sistema di saldatura G.M.A.W. Nel descrivere il processo utilizzeremo una curva caratteristica del generatore a tensione cadente (altrimenti detta in modo improprio "a corrente costante"); tale tipo di caratteristica è quella preferita nella saldatura ad elettrodo rivestito. Il meccanismo di accensione che tratteremo può essere applicato tal quale ad un processo di saldatura G.M.A. W. considerando 2 differenze sostanziali:

1. Nel procedimento ad elettrodo rivestito la lunghezza d'arco viene mantenuta costante dal saldatore che avvicina l'elettrodo al metallo base man mano che l'elettrodo stesso si consuma per effetto del passaggio di corrente; nell'effettuare tale movimento, la torcia di saldatura si avvicina al metallo base. Nel procedimento G.M.A.W. il saldatore mantiene la torcia di saldatura ad una distanza costante dal metallo base dato che l'elettrodo viene alimentato nel bagno di fusione da un sistema di alimentazione automatico.

2. La curva caratteristica esterna del generatore utilizzato nei procedimenti ad elettrodo rivestito e' del tipo a tensione cadente; la curva caratteristica utilizzata nei procedimenti di saldatura G.M.A.W. è a tensione costante con forma più o meno cadente.

Tali differenze determinano un meccanismo di accensione caratterizzato da un transitorio più breve anche se perfettamente simile.

Il meccanismo di accensione dell'arco può essere schematizzato nella seguente maniera, (Fig 1.8).

Il saldatore mette in corto circuito l'elettrodo ed il metallo base tra i quali inizialmente era presente una differenza di potenziale pari a V_0 = tensione a vuoto (punto A); in tale fase la differenza di potenziale tra gli elettrodi si annulla rapidamente e attraverso essi passerà una corrente I_{cc} = corrente di corto circuito (punto B) che determinerà, per effetto Joule, un aumento di temperatura, favorendo così l'effetto termoionico. Successivamente il saldatore staccherà l'elettrodo dal metallo base; in questa fase si verifica un transitorio che porterà la tensione al valore V_t superiore al valore V_f che si avrà quando l'arco sarà acceso, necessario per accelerare sufficientemente gli elettroni ed innescare l'arco; successivamente la tensione si abbasserà al valore finale V_f al quale si avrà un arco stabile di lunghezza l .

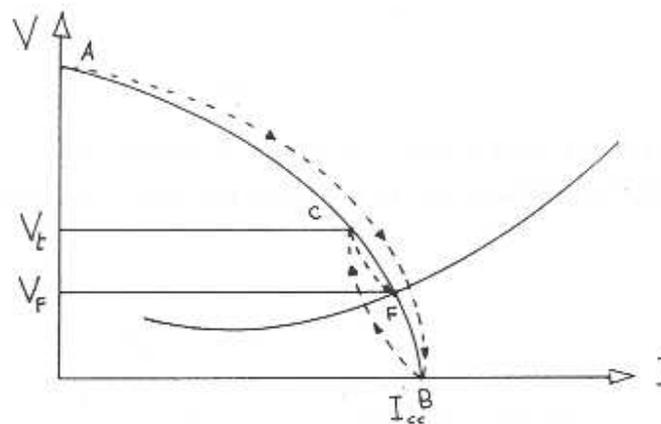


Fig. 7.1 : Meccanismo di accensione relativo ad un procedimento ad elettrodo rivestito.

La tensione a vuoto V_0 serve per vincere le resistenze di contatto e quindi per permettere il passaggio della corrente I_{cc} e rappresenta la massima differenza di potenziale o la massima forza spingente a cui possono essere sottoposti gli elettroni quando l'elettrodo viene allontanato dal metallo base. Valori generalmente utilizzati per V_0 sono compresi tra i 60 e gli 80 V.

Generalmente la minima lunghezza d'arco realizzabile é pari al diametro dell'elettrodo utilizzato e per ogni elettrodo si può utilizzare una corrente di $12 \div 16$ A per ogni mm^2 di sezione trasversale. Questo implica che ,all'aumentare della corrente oltre certi limiti, si deve:

- 1) aumentare il diametro dell'elettrodo;
- 2) aumentare la lunghezza minima d'arco e di conseguenza aumentare anche la tensione minima di saldatura.

Possiamo allora ritenere che la tensione d'arco vari in funzione della corrente secondo la legge:

$$V = (20 + 0,04 I) \text{ V se } I < 600 \text{ A}$$

$$V = (44) \text{ V se } I > 600 \text{ A}$$

dove V rappresenta il valore più probabile o medio esistente tra l'elettrodo ed il metallo base quando si utilizza una corrente di saldatura pari ad 1.

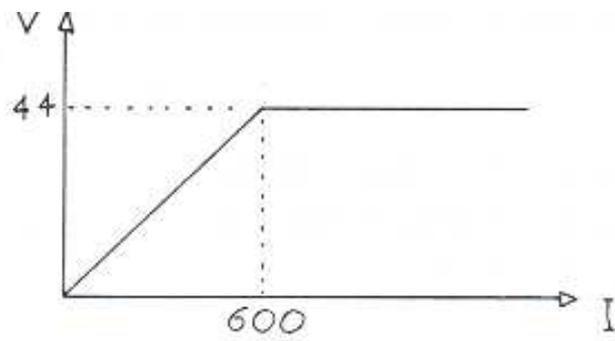


Fig.1. 8: Tensione convenzionale di saldatura.

1.5. FUNZIONAMENTO

Una volta analizzati i concetti fondamentali cerchiamo di capire cosa avviene durante la saldatura. Una volta impostati tutti i parametri del processo, tensione, velocità di alimentazione filo, ed iniziata la saldatura, si dovrà verificare che la velocità di fusione del filo corrisponda con la velocità di alimentazione dello stesso, se no si potrebbero verificare fenomeni di spegnimento dell' arco o impuntamento del filo. In particolare potrebbe verificarsi che per cause impreviste la torcia si allontani leggermente dal pezzo da saldare portando ad un allungamento dell'arco con possibilità di spegnimento oppure potrebbe accadere l'inverso. Per evitare questi fenomeni di instabilità si sono studiati dei meccanismi che portano ad una autoregolazione quasi istantanea della lunghezza dell' arco e si è trovata la soluzione ottimale accoppiando un generatore a tensione costante con un alimentatore di filo a velocità costante. Spieghiamo cosa avviene.

Consideriamo innanzitutto un punto di funzionamento iniziale 1, Fig 1.9; tale punto è determinato dalla intersezione della curva caratteristica del generatore a tensione costante con la curva caratteristica interna dell'arco corrispondente ad una lunghezza d'arco l_1 , curva che chiameremo I_1 . Sono necessarie alcune precisazioni:

- La curva caratteristica del generatore non è esattamente a tensione costante, nella realtà si utilizzano generatori che hanno curve caratterizzate da una caduta di tensione pari a circa 1 V ogni 100 A (nella figura è stata accentuata tale pendenza).

- Al fine di determinare il punto di funzionamento non bisogna considerare la curva dell'arco elettrico I_1 bensì la curva che chiameremo "dell' arco di saldatura" L_1 ; tale curva differisce da quella dell' arco elettrico perché associa ad ogni valore della corrente la caduta di tensione che avviene nell'arco elettrico più la caduta di tensione che avviene nello stick-out (estensione dell'elettrodo o più precisamente sporgenza libera dell'elettrodo: il filo, uscendo dalla pistola, abbandona il guidafile, che gli dà corrente, mostrando un tratto di filo sporgente, a sbalzo, detto appunto sporgenza libera o stick-out). Infatti il circuito esterno "visto" dal generatore è costituito dall'arco elettrico + lo stick-out.

Vedremo in seguito che la caduta di tensione che avviene nello stickout è trascurabile rispetto alla caduta di tensione che avviene nell'arco; al fine di trattare l'argomento in maniera precisa è comunque corretto tenerla in considerazione.

In modo più preciso, quindi, dobbiamo dire che il punto di funzionamento iniziale 1 è determinato dalla intersezione della curva caratteristica del generatore a tensione costante con la curva dell' arco di saldatura L_1 corrispondente ad una lunghezza d'arco I_1 .

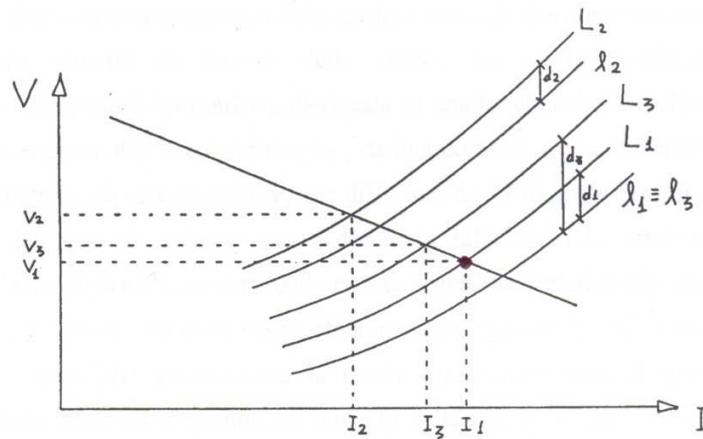


Fig. 1.9 : Meccanismo di autoregolazione per un sistema costituito da un generatore a tensione costante ed un sistema di alimentazione del filo a velocità costante.

Nel caso in cui avvenga un arretramento della torcia, dovuta ad esempio ad un errore del saldatore, la lunghezza dello stick-out si conserva inizialmente costante e quindi la lunghezza dell' arco di saldatura tende ad aumentare. Le curve di funzionamento dell' arco diventano I2 ed L2. Il nuovo punto di funzionamento ottenuto nei primi istanti successivi all'avvenuta variazione è quindi determinato dalla intersezione della curva caratteristica del generatore con la nuova curva "dell'arco di saldatura" L2. Come si può notare dalla Fig.1.9 la corrente di saldatura diminuisce al valore L2 e la tensione di saldatura aumenta leggermente fino ad assumere il valore V2 (nella Fig.1.9 è stata volutamente accentuata la pendenza della curva caratteristica del generatore; nella realtà, il valore V2 differisce da V1 di pochi decimi di volt e quindi è difficilmente apprezzabile sul voltmetro installato sugli impianti industriali). Tale diminuzione di corrente determina una velocità di fusione del filo inferiore alla velocità di avanzamento dello stesso, con un conseguente aumento dello stick-out e quindi una diminuzione della lunghezza d'arco fino ad arrivare ad I3 (coincidente con I1), lunghezza d'arco in corrispondenza della quale la velocità di avanzamento del filo eguaglia la velocità di fusione dello stesso. La nuova condizione di funzionamento di equilibrio sarà caratterizzata da una lunghezza d'arco I3 a cui fa riscontro una curva dell'arco elettrico L3 , dalla corrente I3 che differisce da I1 di alcuni ampere, da una tensione V3 che differisce da V1 di pochi decimi di volt. La curva dell' arco di saldatura sarà individuata dalla curva L3 ottenuta dalla curva dell' arco elettrico h corretta della caduta di tensione relativa allo stick-out; tale caduta di tensione risulterà essere chiaramente maggiore dei valori assunti in precedenza, dato che, allontanando la torcia dal metallo base ,si genera un aumento dello stick-out e quindi un aumento della resistenza del filo stick-out. Per maggior precisione

bisognerebbe dire che ad uno stick-out maggiore e quindi ad una resistenza elettrica maggiore, fa riscontro una diminuzione di corrente; in ogni caso la caduta di tensione ($V = IR$) tra il guidafilo ed il metallo base sarà maggiore, dato che la corrente diminuirà in misura nettamente inferiore rispetto all'aumento di resistenza.

Quanto descritto è ciò che avviene fisicamente; bisogna ad ogni modo precisare che:

1. La pendenza poco accentuata della curva caratteristica del generatore determina una variazione della tensione non misurabile dai comuni voltometri utilizzati sugli impianti industriali e comunque trascurabile. La conseguenza di ciò è che V_3 coincide praticamente con V_1 nella realtà industriale. Diverso è il caso in cui si utilizzi un generatore con una curva caratteristica avente una pendenza apprezzabile.

2. La caduta di tensione che avviene nello stick-out è piccola rispetto alla caduta di tensione che avviene nell'arco elettrico. La conseguenza di ciò è che la curva d'arco di saldatura L_3 è poco distante dalla curva L_1 .

Da tali considerazioni si evidenzia come il procedimento di saldatura G.M.A.W. sia un procedimento fortemente stabile ed auto regolante.

Analoghe considerazioni si possono fare per un avvicinamento della torcia.

1.6. MECCANISMI DI TRASFERIMENTO DEL METALLO D'APPORTO

Le caratteristiche del processo G.M.A.W. sono ben descritte in termini di tre diversi meccanismi di trasferimento dell'elettrodo nel bagno di fusione:

1. “short-arc” o ad immersione o per cortocircuito (o short circuiting transfer).
2. “drop-arc” o di tipo globulare, cioè a grosse gocce (o Globular transfer).
3. “spray-arc” o di tipo polverizzato, cioè a piccole gocce.

Il tipo di trasferimento che si instaura é determinato da diversi fattori, i più importanti dei quali sono:

- valore e tipo di corrente di saldatura
- diametro dell'elettrodo
- composizione dell'elettrodo
- stick-out o estensione dell'elettrodo o sporgenza libera
- gas di protezione . tensione d'arco
- velocità del filo
- caratteristiche statiche e dinamiche della saldatrice

1.6.1 Short arc

Il trasferimento di metallo avviene con il trasferimento di gocce grosse con bassa frequenza, ognuna delle quali genera un cortocircuito che estingue l'arco elettrico. Questo tipo di trasferimento del metallo d'apporto richiede le più basse correnti ed i più piccoli diametri di elettrodo che si possano utilizzare con il processo G.M.A.W. ; si adottano generalmente tensioni inferiori a 20V (12÷20V), correnti inferiori ai 220A (70A ÷ 180A), diametri del filo compresi tra 0,6mm e 1,2mm. Con questo tipo di trasferimento l'apporto termico é estremamente basso e quindi produce un piccolo bagno di fusione che si raffredda velocemente determinando un basso riscaldamento del giunto. E' quindi generalmente adatto per la saldatura di spessori sottili, per saldature fuori posizione, per la saldatura di giunti caratterizzati da gap elevati (gap è la distanza tra i lembi da saldare) e per la saldatura di metalli a bassa temperatura di fusione.

Il modesto apporto termico di tale regime comporta, però, due rischi: l'incollatura, per mancata fusione del metallo base (specie nella saldatura di spessori elevati e nella saldatura di materiali buoni conduttori) e la formazione di soffiature o porosità causata dalla velocità di solidificazione elevata.

Il metallo é trasferito dall'elettrodo al bagno di fusione solo quando l'elettrodo é in contatto con il bagno di fusione e quindi solo durante il periodo di corto circuito, mentre durante il periodo di accensione dell'arco non vi é alcun trasferimento di metallo. I contatti tra l'elettrodo ed il bagno di fusione avvengono con una frequenza di 20÷200 volte al secondo.

La Fig.1.10 ci mostra la sequenza degli eventi nel trasferimento del metallo ed il corrispondente andamento della corrente e della tensione. Non appena l'elettrodo tocca il metallo base la corrente inizia ad aumentare tendendo alla I_{cc} (punti A,B,C,D.). Il metallo fuso all'estremità del filo viene rimosso tra i punti D ed E per effetto della strizione elettromagnetica generata dalla corrente di cortocircuito e contemporaneamente la corrente di corto circuito viene rapidamente smorzata dalla induttanza del generatore; per effetto del distacco della goccia dal filo, aumenta la tensione e si riaccende l'arco come si può osservare nei punti E ed F.

Quando l'arco si è ristabilizzato il filo inizia a fondere all'estremità; contemporaneamente il filo viene fatto avanzare sino ad innescare il successivo cortocircuito (punto H) che estinguerà l'arco (punto I) permettendo al bagno di raffreddarsi. Ricomincia a tal punto il nuovo ciclo. La velocità con cui aumenta la corrente durante il periodo di corto circuito dipende dal valore dell'induttanza del generatore; essa deve essere abbastanza elevata (ciò implica che la induttanza non deve essere troppo elevata) da fondere l'elettrodo e promuovere il trasferimento del metallo evitando impuntamenti del filo ma anche abbastanza contenuta (ciò implica che la induttanza non deve essere troppo bassa) da minimizzare gli spruzzi causati dalla violenta separazione della goccia di metallo dal filo. La scelta ottimale di questa induttanza dipende sia dalla resistenza elettrica del circuito di saldatura, sia dalla pendenza della curva caratteristica del generatore e sia dalla temperatura di fusione dell'elettrodo.

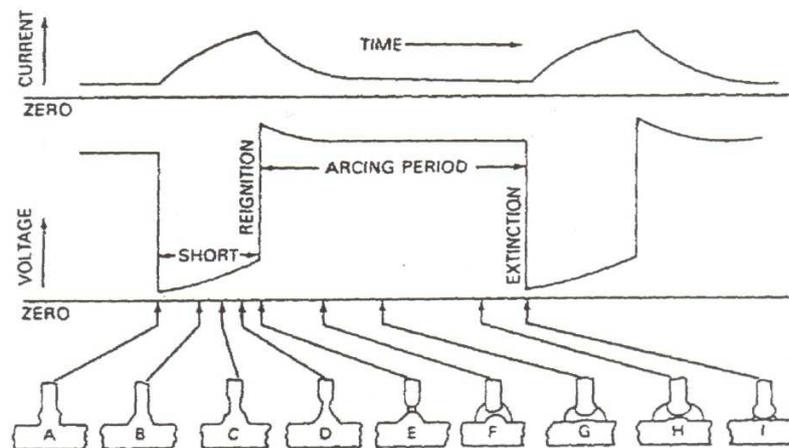


Fig.1.10 : Rappresentazione schematica del trasferimento short-arc

La tensione a circuito aperto (punti E,F,G,H) fornita dal generatore deve essere sufficientemente bassa affinché la goccia di metallo fuso all'estremità del filo non venga trasferita finché essa stessa non tocca il metallo base, creando quindi il successivo cortocircuito. L'energia per il mantenimento dell'arco è fornita in parte anche dall'energia immagazzinata nell'induttanza durante il periodo di cortocircuito.

La composizione del gas di protezione ha una elevata influenza sulla tensione superficiale del metallo fuso. Una variazione nella composizione del gas di protezione può influenzare fortemente la dimensione della goccia e la durata del cortocircuito. Inoltre il tipo di gas fa variare le caratteristiche operative dell'arco e la penetrazione del metallo base. L'anidride carbonica generalmente produce molti spruzzi rispetto ai gas inerti ma genera di solito anche una penetrazione maggiore. Per ottenere un buon compromesso tra spruzzi e penetrazione sono spesso usate nelle saldature degli acciai al carbonio e basso-legati miscele di CO₂ ed argon.

Un'aggiunta di elio all'argon aumenta la penetrazione nei vari metalli non ferrosi.

1.6.2. Globular arc

Con l'elettrodo collegato al polo positivo del generatore il trasferimento globulare avviene quando la corrente è relativamente bassa, indipendentemente dal tipo di gas di protezione, anche se con l'anidride carbonica e l'elio questo tipo di trasferimento può avvenire con tutti i valori di corrente utilizzati in saldatura. Il trasferimento globulare è caratterizzato da un diametro della goccia più grande dello stesso elettrodo. Questa grossa goccia, per il suo peso, è facilmente depositata nel bagno di fusione sotto l'azione della gravità e questo limita l'applicazione di tale procedimento alla posizione piana di saldatura. E' generalmente caratterizzato da un arco turbolento, da una scarsa penetrazione, da un cordone irregolare e da forti spruzzi.....
Con correnti medie, solo di poco più alte rispetto a quelle usate nel processo short-arc e con una protezione di gas inerte, il trasferimento globulare è diretto assialmente.

Se la lunghezza dell'arco è troppo corta (basso voltaggio), la grandezza della goccia potrebbe determinare un corto circuito con il metallo base, diventare molto calda e disintegrarsi producendo considerevoli spruzzi. L'arco deve essere perciò abbastanza lungo da assicurare il distacco della goccia prima che essa entri in contatto con il bagno di fusione, facendo attenzione al fatto che una saldatura effettuata con un valore di tensione elevato risulta probabilmente inaccettabile per la mancanza di fusione, di sufficiente penetrazione ed eccessivo sovrametallo con cordone non ben raccordato (forma del cordone detta comunemente "a schiena d'asino"). Questo limita molto l'uso del tipo di trasferimento globulare nelle applicazioni industriali.

Con una protezione di gas costituita da anidride carbonica e con correnti e tensioni significativamente superiori a quelle usate nello short-arc, si ottiene un trasferimento globulare caratterizzato da una direzione casuale e non assiale. L'allontanamento dal modo di trasferimento assiale è dovuto alle forze elettromagnetiche generate dalla corrente di saldatura che agiscono sulla estremità fusa dell'elettrodo. Le più importanti di queste sono la forza di strizione elettromagnetica (P) e la forza di reazione dell'anodo R.

L'intensità della forza di strizione è una funzione diretta della corrente di saldatura e del diametro del filo ed è generalmente responsabile del distacco della goccia di metallo fuso dal filo.

Con una protezione di CO₂ la corrente di saldatura è trasmessa attraverso la goccia fusa e l'estremità dell'elettrodo, a monte della goccia fusa, non è avvolta dal gas ionizzato. Una serie di fotografie ad alta velocità mostra che l'arco si muove tra la superficie della goccia fusa ed il metallo base, dato che la forza R tende a supportare la goccia. La goccia fusa si ingrossa fino a che non viene distaccata dal cortocircuito (Fig.1.11B) o dalla gravità (Fig.1.12A), dato che la tendenza a supportare la goccia da parte della forza di reazione dell'anodo R, non è mai inferiore alla tendenza di separare la goccia dovuta alla forza di strizione elettromagnetica P.

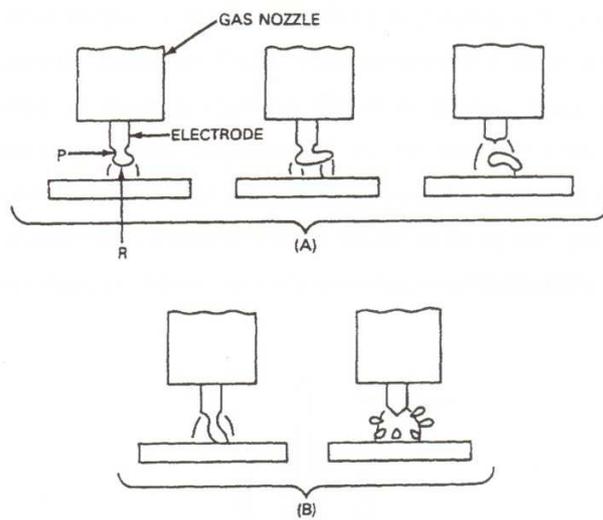


Fig. 1.11: Trasferimento globulare non assiale.

Come mostrato in Fig.1.11 é possibile che la goccia venga distaccata e trasferita nel bagno di fusione, senza esplodere o disintegrarsi. La situazione più probabile é mostrata nella Fig1.11B dove la goccia va in contatto con il metallo base, creando un cortocircuito, ed esplodendo. In questo caso gli spruzzi possono essere molto grossi e questo limita l'uso della protezione di gas con CO₂ per molte applicazioni commerciali.

Ad ogni modo la CO₂ rimane il più comune gas utilizzato per la saldatura degli acciai a basso tenore di carbonio. La ragione principale sta nella possibilità di poter minimizzare il problema degli spruzzi adottando una lunghezza d'arco molto piccola e generando l'arco elettrico in posizione più profonda rispetto alla superficie non fusa del metallo base. Così facendo, l'atmosfera dell'arco elettrico diventa una miscela di gas e vapori di ferro generando in tal modo un trasferimento di metallo quasi simile ad uno spray. Le forze elettromagnetiche dell'arco sono sufficienti a formare una cavità sottoposta rispetto alla superficie del metallo base non fuso, cavità che riesce a trattenere la maggior parte degli spruzzi. Questa tecnica, chiamata "Buried arc" o "Arco immerso", richiede alte correnti di saldatura e genera una elevata penetrazione. Comunque, a meno che la velocità di spostamento non sia attentamente controllata, una scarsa bagnabilità del metallo fuso può determinare un eccessivo sovrametallo ed un cordone non ben raccordato lateralmente.

1.6.3. Spray arc

Con un gas di protezione ricco di argon é possibile produrre un tipo di trasferimento spray-assiale privo di spruzzi e molto stabile, così come mostrato nella Fig.1.12.

Questo tipo di trasferimento richiede l'utilizzo di:

- una corrente continua;
- un elettrodo collegato al polo positivo;
- un valore della tensione d'arco generalmente variabile tra i 25 e 42 volt
- un valore della corrente al di sopra di un valore critico detto "corrente di transizione". Al di sotto di questo valore il trasferimento si presenta di tipo globulare (Drop-Arc), così come è stato descritto nel precedente paragrafo (trasferimento caratterizzato da deposito di materiale d'apporto sotto forma di grosse gocce con una frequenza di poche gocce al secondo). Al di sopra della corrente di transizione il trasferimento si presenta sotto forma di piccolissime gocce che si formano e si distaccano con una frequenza molto elevata e pari a centinaia di gocce al secondo. Queste gocce sono accelerate assialmente attraverso l'arco.

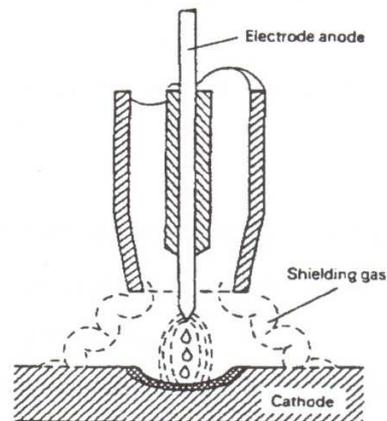


Fig. 1.12 : Trasferimento spray assiale.

Questo tipo di trasferimento é caratterizzato da un arco piú stabile, da una maggiore penetrazione e da un cordone di saldatura migliore da punto di vista estetico. I fili normalmente impiegati sono del diametro compreso tra 1,2÷2,4mm.

Il tipo di trasferimento Spray si presenta come un flusso di piccole gocce separate, altamente direzionale, accelerate dalle forze dell'arco a velocità superiori rispetto a quelle che si raggiungerebbero per il solo effetto della gravità (la forza di spinta dell'arco é superiore a quella gravitazionale). L'immediata conseguenza é che tale processo, con determinati accorgimenti, può essere usato in ogni posizione. C'è da notare che il diametro delle gocce é molto piú piccolo della

lunghezza dell'arco, per cui non avvengono cortocircuiti e gli spruzzi sono trascurabili, anche se non totalmente eliminabili.

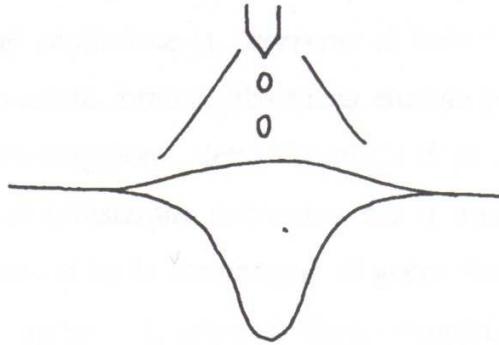


Fig. 1.13 : Profilo del cordone a “gola” o a “dito”.

Sebbene tale gola possa essere profonda, essa é influenzata dai campi magnetici che devono essere controllati in maniera tale da essere mantenuti al centro del profilo di penetrazione della saldatura.

Il tipo di trasferimento spray-arc può essere usato per saldare quasi tutti i metalli e le relative leghe, date le caratteristiche di gas inerte del gas argon comunemente utilizzato come gas di protezione. In ogni caso l'utilizzo del processo per la saldatura di lamiere sottili può essere difficoltosa a causa delle elevate correnti necessarie per produrre lo spray arc. Le forze dell'arco possono "sfondare" (tagliare) invece di "saldare" le lamiere sottili. Inoltre la elevata deposizione di metallo può produrre un bagno di fusione di dimensioni eccessive per essere trattenuto dalla tensione superficiale del metallo fuso nella saldatura in posizione verticale o sopratesta.

Le limitazioni dovute alle difficoltà di saldare piccoli spessori e di saldare in posizione verticale o sopratesta sono state ampiamente superate con un particolare tipo di impianto di saldatura. Questo tipo di impianto produce un accurato controllo della corrente di saldatura generando una corrente non più costante, ma "pulsata".

Spray-arc pulsato:

Come mostrato nella Fig.1.14 tale impianto produce due livelli di corrente: uno minore, che costituisce la “corrente di base” e che svolge il solo ruolo di alimentare l’arco senza fornire abbastanza energia per formare la goccia all’estremità del filo; l’altro maggiore, detto “corrente di picco” avente un valore maggiore della corrente di transizione necessaria per il trasferimento spray-arc. Durante il picco di corrente si ha la formazione di goccioline ed il trasferimento di queste con modalità spray . L’intensità degli impulsi, la loro durata, la frequenza con la quale si ripetono, la loro forma (sinusoidale, triangolare o rettangolare), il livello della corrente di fondo sono variabili che influenzano la lunghezza e la larghezza dell’arco, la velocità di fusione, la sezione del cordone, il fenomeno degli spruzzi. Con la parziale riduzione sia dell’energia fornita all’arco e sia della velocità di fusione del filo, questo tipo di procedimento, detto “arco pulsato” costituisce un ampliamento del trasferimento spray-arc utile per la saldatura di lamiere sottili e per la saldatura di grossi spessori in tutte le posizioni.

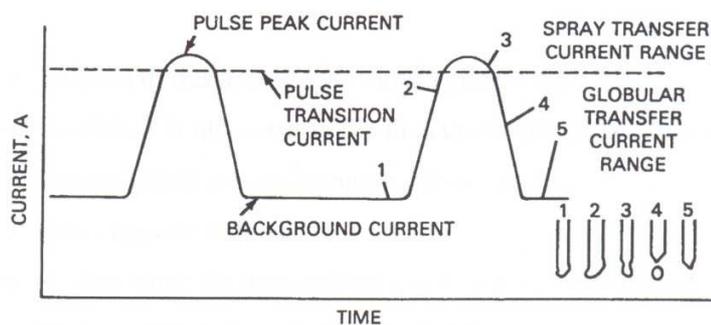


Fig. 1.14:Caratteristiche della variazione della corrente in un procedimento spray-arc pulsato.

Siccome le forze dell'arco ed il tasso di deposizione sono dipendenti esponenzialmente con la corrente, l'utilizzo di correnti di saldatura maggiori della corrente di transizione rende le forze elettromagnetiche dell' arco incontrollabili nelle posizioni di saldatura verticale e sopratesta. Riducendo la corrente media con le pulsazioni, le forze dell'arco e la velocità di deposizione possono essere entrambe ridotte, rendendo possibili le saldature in posizione e le saldature di lamiere sottili con un tipo di trasferimento spray. Altri vantaggi di questa tecnica sono quelli di poter regolare l'apporto termico specifico, di poter ridurre ancor di più gli spruzzi ed al limite eliminarli completamente aumentando così l'efficienza della deposizione del metallo, di poter ottenere saldature estetiche, di poter adoperare fili di più grosso diametro pur utilizzando valori di corrente media minori della corrispondente corrente di transizione. Sono disponibili molti tipi di tali generatori. Il più semplice fornisce una singola frequenza di pulsazioni (60 o 120pps) con un controllo indipendente del livello della corrente di base e di quella pulsata. Il più sofisticato fornisce automaticamente la combinazione ottimale della corrente di base, di quella di picco, della frequenza delle pulsazioni e della durata del picco in funzione della velocità di avanzamento del filo preselezionate. Tali impianti vengono detti "Impianti Sinergici Pulsati".

Ricapitolando possiamo dire che i principali vantaggi del procedimento spray pulsato sono:

- Velocità di traslazione della torcia uguali o superiori.
- Possibilità di utilizzare un filo di diametro più grande (più economico).

- Spruzzi ridotti o completamente eliminati.
- Basso apporto termico.
- Miglior controllo della saldatura nelle posizioni sopratesta o verticali.
- Buona penetrazione e forma del cordone.

I principali svantaggi sono:

- Costo superiore dell'impianto.
- Maggiore difficoltà nel selezionare i parametri di saldatura..

Può risultare utile un confronto tra i campi di stabilità del trasferimento in regime short-arc ed in quello spray ed i fili utilizzati.

2. ESAME DEI PARAMETRI DI SALDATURA E STUDIO DELLA LORO INFLUENZA.

2.1. PARAMETRI DI SALDATURA

I parametri che maggiormente influenzano le principali caratteristiche della saldatura, come la profondità di penetrazione, la geometria del cordone e la qualità del giunto, sono i seguenti:

1. Corrente di saldatura
2. Polarità della corrente
3. Tensione dell'arco (lunghezza dell'arco)
4. Velocità di spostamento della torcia di saldatura
5. Stick-out
6. Posizione della torcia di saldatura o tecnica di saldatura "*a spingere*" o "*a tirare*".
7. Posizioni del giunto di saldatura e preparazione dei lembi
8. Diametro dell'elettrodo
9. Composizione del gas di protezione e portata volumetrica
10. Velocità di alimentazione del filo o dell'elettrodo

La conoscenza della loro influenza ed il relativo controllo sono essenziali al fine di ottenere saldature di buona qualità. Tali parametri di saldatura non sono completamente indipendenti tra loro; infatti, per avere i risultati desiderati, il cambiamento di uno di essi richiede il cambiamento di uno o più degli altri.

Generalmente possiamo dire che la forma del cordone é funzione della corrente di saldatura, della velocità di spostamento della torcia, della tensione d'arco del gas di protezione e della posizione della torcia.

Le proprietà meccaniche e metallurgiche del metallo di saldatura e della zona termicamente alterata dipendono principalmente dal tipo di metallo base, dalla composizione del metallo d'apporto e dalla velocità di raffreddamento, che é strettamente legata alla forma del giunto ed alla dimensione del cordone; anche l'effetto del tipo di gas di protezione é influente e rimane fondamentale la sua presenza.

Per riuscire a selezionare, per ogni tipo di applicazione, la combinazione ottimale di questi parametri é necessaria un'ottima conoscenza ed una elevata esperienza.

Questi valori ottimali sono influenzati:

- 1) dal tipo di metallo base,
- 2) dalla composizione chimica dell'elettrodo,
- 3) dalla posizione di saldatura,
- 4) dalla qualità del giunto richiesta.

E' per tale motivo che non esiste un unico set di valori che riesca a soddisfare in tutti i casi le esigenze richieste.

2.1.1. CORRENTE DI SALDATURA

Quando tutte le altre variabili sono mantenute costanti, la corrente di saldatura é funzione della velocità di avanzamento del filo in maniera non lineare. Se si utilizza un generatore di corrente a tensione costante, non appena la velocità di avanzamento del filo varia, varierà analogamente la corrente (questo é valido anche per un generatore a tensione cadente) e quindi la regolazione della corrente di saldatura potrà essere effettuata entro ampi limiti intervenendo sulla manopola di regolazione della velocità di avanzamento del filo, senza variare nessun altro parametro. Nella *Fig.2.1* é mostrata la relazione esistente fra la corrente di saldatura e la velocità di avanzamento del filo per un elettrodo di acciaio al carbonio.

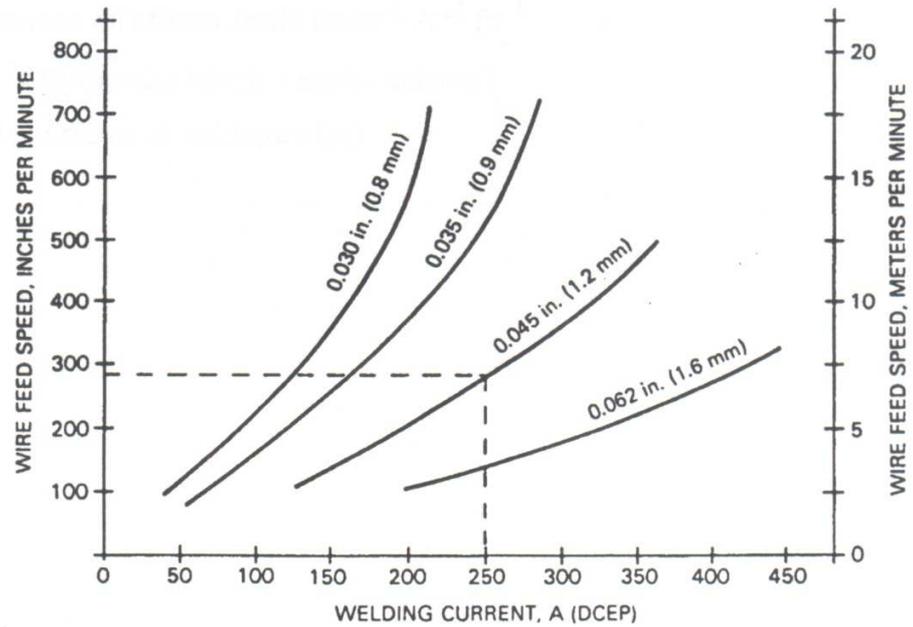


Fig.2.1 : Relazione tra la corrente di saldatura e la velocità di avanzamento del filo per un elettrodo di acciaio al carbonio.

Come si può osservare dalla figura, per bassi valori della corrente e per i vari diametri dell'elettrodo, queste curve si presentano quasi lineari. Per i più alti valori della corrente, ed in particolare per i diametri dell'elettrodo più piccoli, le curve diventano non lineari e progressivamente, all'aumentare della corrente, sempre più esponenziali. Questo fenomeno è dovuto al riscaldamento per effetto Joule dello stick-out .

Le curve possono essere espresse, approssimativamente, dalla relazione:

$$v = aI + bL$$

dove:

- “v” è la velocità di alimentazione dell'elettrodo (mm/s)
- “a” è una costante di proporzionalità legata al riscaldamento dell'anodo o del catodo. Il suo valore è dipendente dalla polarità, dalla composizione e da altri fattori.
- “b” è una costante di proporzionalità legata al riscaldamento dovuto all'effetto Joule dell'elettrodo.
- “L” è la sporgenza libera o stick-out
- “I” è la corrente di saldatura.

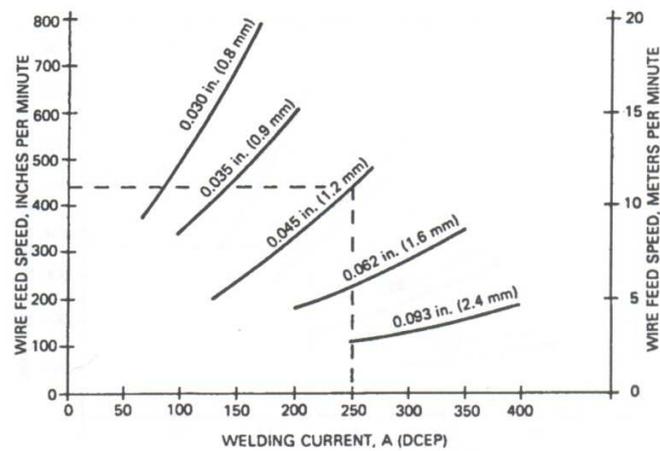


Fig.2.2 : Relazione tra la corrente di saldatura e la velocità di avanzamento del filo per un elettrodo di alluminio ER4043

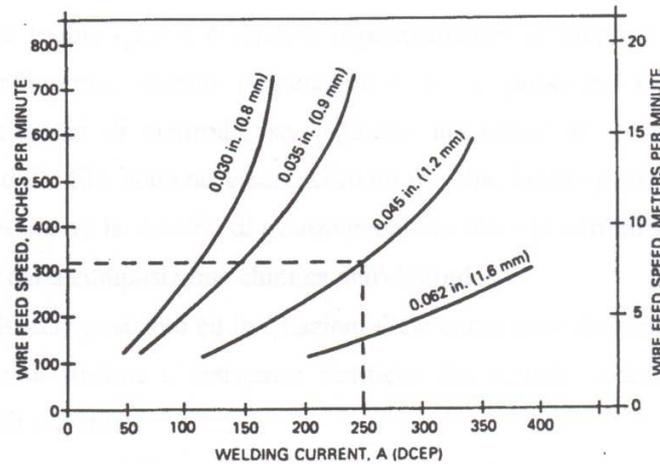


Fig. 2.3 - Relazione tra la corrente di saldatura e la velocità di avanzamento del filo per un elettrodo di acciaio inossidabile serie 300

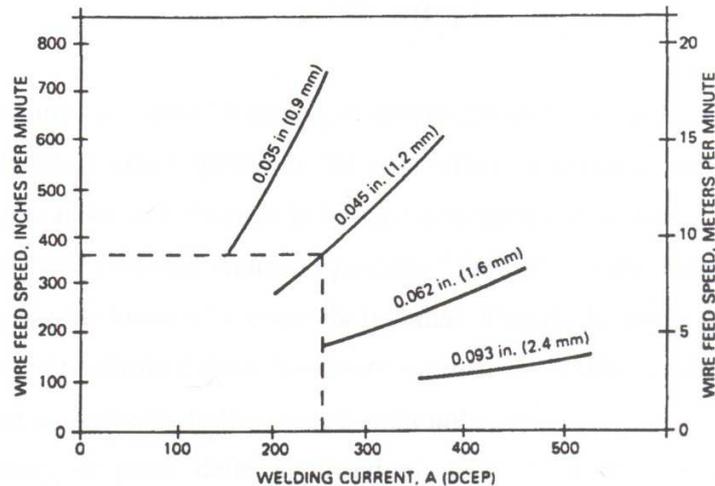


Fig. 2.4 - Relazione tra la corrente di saldatura e la velocità di avanzamento del filo per un elettrodo di rame

Dalle Fig.2.1, 2.2 , 2.3 e 2.4 relative rispettivamente ad elettrodi di acciaio al carbonio, alluminio, acciaio inossidabile e rame, possiamo notare che per diametri maggiori di elettrodo, se vogliamo mantenere la stessa velocità di avanzamento del filo, sono necessarie correnti più alte. Inoltre possiamo osservare che la relazione tra la velocità di avanzamento del filo e la corrente di saldatura é dipendente dalla composizione chimica dell'elettrodo.

Le diverse posizioni ed inclinazioni delle curve sono dovute alle differenti temperature di fusione e resistenze elettriche dei metalli. Anche lo stick-out influenza tali relazioni.

Un aumento della corrente di saldatura, e di conseguenza un aumento della velocità di avanzamento dell'elettrodo, determinerà ovviamente un aumento del tasso di deposizione, ma anche un aumento della profondità e della larghezza di penetrazione con un aumento conseguente della sezione del cordone di saldatura.

2.1.2 POLARITÀ

Il termine "*polarità*" é usato per descrivere la connessione elettrica della torcia di saldatura con i terminali del generatore in corrente continua (polo positivo o polo negativo). Quando la torcia é collegata al polo positivo, la polarità é detta "*corrente continua elettrodo positivo*" (DCEP - sigla inglese) o spesso chiamata "*polarità inversa*" (ccpi-sigla italiana). Quando la torcia é collegata al polo negativo, la polarità é detta "*corrente continua elettrodo negativo*" (DCEN-sigla inglese) o "*polarità diretta*" (ccpd-sigla italiana).

La maggior parte delle applicazioni del G.M.A.W. usa una polarità inversa, DCEP. Questa condizione determina un arco stabile, un trasferimento di metallo tranquillo, spruzzi relativamente bassi, buone caratteristiche del cordone di saldatura e grandi profondità di penetrazioni, legate ad un ampia gamma di corrente di saldatura.

La polarità diretta é usata raramente, perché il trasferimento spray assiale non é realizzabile senza effettuare notevoli modifiche al sistema di saldatura; tali modifiche hanno reso il processo scarsamente interessante per applicazioni industriali. La polarità diretta ha il grosso vantaggio di avere tassi di deposito molto elevati anche se non possono essere sfruttati a pieno, dato che il trasferimento di metallo diventa di tipo globulare. Con gli acciai, il trasferimento

può essere migliorato addizionando un minimo di 5% di O₂ all' Argon (e utilizzando leghe speciali per compensare la parziale perdita di elementi di lega dovuta alla ossidazione) o con un trattamento del filo per renderlo termoionico (aumentando però il costo del metallo d'apporto). In entrambi i casi diminuiscono i tassi di deposizione, eliminando l'unico vantaggio legato al cambiamento di polarità. Comunque, dato l'elevato tasso di deposizione e la ridotta penetrazione , la polarità diretta ha trovato applicazione in alcuni procedimenti di riporti superficiali.

Il tentativo di usare corrente alternata con il processo G.M.A.W ha generalmente avuto risultati negativi. La forma sinusoidale della corrente genera un arco instabile dovuto alla tendenza dell'arco ad estinguersi non appena la corrente attraversa lo zero. Nonostante siano stati sviluppati speciali materiali di apporto per ovviare a questi problemi, il costo di saldatura sarebbe così elevato da rendere il procedimento antieconomico e, quindi, inutilizzabile.

2.1.3. TENSIONE D'ARCO - LUNGHEZZA D'ARCO

Tensione d'arco e lunghezza d'arco sono termini che spesso sono usati come sinonimi. Dobbiamo sottolineare, comunque, che sono due grandezze diverse anche se correlate tra loro.

Nel G.M.A.W. la lunghezza dell'arco é una variabile critica che deve essere attentamente controllata. Per esempio, in un regime spray-arc, con una protezione

di argon, un arco troppo corto determina brevi cortocircuiti e quindi problemi di spallinatura. Questi cortocircuiti causano fluttuazioni della pressione che aspirano aria ambiente nel flusso dell'arco, producendo porosità o infragilimento dovuto all'assorbimento di azoto.

Se l'arco é troppo lungo, esso diventa instabile, influenzando sia la penetrazione che il profilo del cordone. Un arco troppo lungo può anche interrompere la protezione del gas. Nel caso di *'buried arc'* o *'arco immerso'* con protezione di CO₂, un arco lungo determina sia spruzzi che porosità; se l'arco é troppo corto l'estremità dell'elettrodo cortocircuita il bagno di fusione causando instabilità. Generalmente possiamo dire che con archi troppo lunghi si ha instabilità dell'arco dovuta ad un insufficiente valore del campo elettrico e, quindi, della capacità ionizzante; con archi troppo corti si possono verificare impuntamenti del filo.

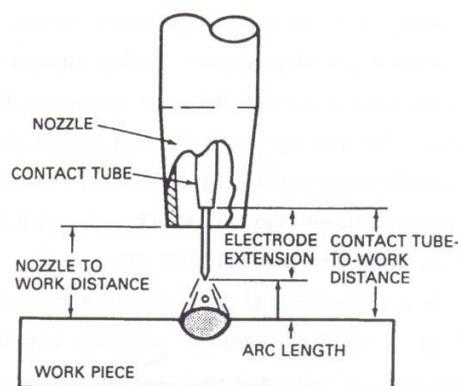


Fig.2.5 - Terminologia del GMAW

La lunghezza dell'arco é la variabile indipendente. La tensione d'arco dipende sia dalla lunghezza dell'arco sia da altre variabili come: la composizione

chimica e la dimensione dell'elettrodo, il gas di protezione, la tecnica di saldatura e, dal momento che la tensione è misurata dal generatore di corrente, anche dalla lunghezza dei cavi di collegamento.

La tensione d'arco e' approssimativamente pari al un valore medio della lunghezza d'arco in termini elettrici; essa include la caduta di tensione che si verifica nello stick-out.

Con tutte le variabili mantenute costanti, la tensione d'arco é funzione diretta della lunghezza d'arco.

Anche se la lunghezza d'arco é la variabile principale da controllare, la tensione d'arco é più facilmente misurabile e quindi controllabile. Per tale motivo nelle specifiche tecniche relative a procedimenti di saldatura omologati si fa riferimento alla tensione d'arco e non alla lunghezza d'arco.

La scelta della tensione della saldatura varia a seconda del materiale, del gas di protezione e del tipo di trasferimento di metallo. Valori tipici sono riportati nella tabella I.

Sono ovviamente necessarie diverse prove per ottimizzare la tensione d'arco e mettere a punto, quindi, caratteristiche d'arco ottimizzate e cordoni di buon aspetto. Tali prove sono essenziali, dato che il valore ottimale della tensione d'arco dipende da diversi fattori quali lo spessore del giunto, tipo di giunto, posizione di saldatura, diametro del filo, composizione chimica del filo e del gas di protezione, ed il tipo di saldatura.

Per ogni specifico valore ottimizzato della tensione d'arco, un aumento della tensione determina un appiattimento del cordone di saldatura ed un aumento della larghezza della zona soggetta a fusione. Una tensione d'arco eccessiva determina

porosità, spallinatura e intaglio marginale. Una riduzione della tensione d'arco determina un cordone di saldatura più stretto con un cresta del cordone più alta ed una maggiore penetrazione. Una tensione troppo bassa può causare impuntamenti dell'elettrodo.

Tabella I

Tipiche tensioni d'arco per la saldatura GMAW di alcuni metalli¹

Metalli	Trasferimento Spray ² Globulare Diametro di elettrodo 1.6 mm (1/16) in.					Trasferimento Cortocircuitato Diametro di elettrodo 1.6 mm (1/16) in.			
	Argon	Elio	25% Ar 75% He	Ar-O ₂ 1-5%O ₂	CO ₂	Argon	Ar-O ₂ 1-5%O ₂	75% Ar 25%CO ₂	CO ₂
Alluminio	25	30	29	-	-	19	-	-	-
Magnesio	26	-	28	-	-	16	-	-	-
Acciaio al carbonio	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acciaio basso legato	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Acciaio inossidabile	24	-	-	26	-	18	19	21	-
Nichel	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Lega Nichel-Rame	26	30	28	-	-	22	-	-	-
Lega Nichel-Cromo-Ferro	26	30	28	-	-	-	22	-	-
Rame	30	36	33	-	-	24	22	-	-
Lega Rame-Nichel	28	32	30	-	-	23	-	-	-
Bronzo al Siliceo	28	32	30	28	-	23	-	-	-
Bronzo di Alluminio	28	32	30	-	-	23	-	-	-
Bronzo al Fosforo	28	32	30	23	-	23	-	-	-

1. Più o meno approssimate al 10%. Tensioni più basse sono normalmente usate su materiali leggeri e bassi amperaggi; tensioni più alte su materiali pesanti e ad alti amperaggi.

2. Per il trasferimento Spray pulsato le variazioni di tensione sono comprese tra i 18 e i 28 volt in funzione del campo di corrente usato

2.1.4. VELOCITÀ DI SPOSTAMENTO DELLA TORCIA DI SALDATURA

La velocità di spostamento é la velocità alla quale la torcia viene spostata lungo il giunto di saldatura. Con tutte le altre variabili mantenute costanti, la penetrazione di saldatura diventa massima ad un valore ben determinato di questa velocità.

Quando la velocità di spostamento viene diminuita, la quantità di metallo d'apporto depositata per unità di lunghezza aumenta. Ad una velocità molto bassa l'arco di saldatura incide sul bagno di fusione, piuttosto che sul metallo base, riducendo in tal modo la penetrazione ottenuta e producendo un cordone di saldatura più largo.

All' aumentare della velocità di spostamento della torcia, l'energia termica trasmessa dall'arco al metallo base per unità di lunghezza di saldatura in un primo momento aumenta, dato che l'arco elettrico incide più direttamente sul metallo base; con un ulteriore aumento della velocità di spostamento, inizia a diminuire.

Perciò la fusione del metallo base, e quindi la penetrazione (direttamente legata all' energia termica specifica apportata al giunto) prima aumenta e poi diminuisce con l'aumentare della velocità di avanzamento della passata.

Se questa velocità viene ulteriormente aumentata, nasce una tendenza a formare incisioni marginali lungo i bordi del cordone di saldatura, data l'insufficiente deposizione di metallo d'apporto.

2.1.5. SPORGENZA LIBERA O STICK-OUT

La sporgenza libera, o estensione non fusa dell'elettrodo, o stick-out, é la distanza compresa tra l'estremità del guida-filo e l'estremità dell'elettrodo, come mostrato in *Fig.2.5*. Quando il filo è all'interno del guida-filo, la densità di corrente che lo attraversa è bassa, essendo anche il guida-filo conduttore, ma quando il filo esce, la densità di corrente aumenta notevolmente causando un notevole riscaldamento per effetto Joule.

Uno stick-out più lungo, a parità di tutte le altre condizioni, determina un aumento della propria resistenza elettrica, e di conseguenza un aumento della temperatura dell' estremità del filo, dovuto al riscaldamento per effetto Joule. Quindi, per fondere l'estremità del filo sarebbe sufficiente una corrente più bassa, ed infatti, come é stato visto nel *paragrafo 1.5. "Meccanismo di autoregolazione"*, la caratteristica esterna del generatore é tale che ad uno stick-out più lungo fa corrispondere un valore di corrente più basso ed un valore di tensione praticamente costante. Possiamo quindi dire che in corrispondenza di uno stick-out più lungo, la tensione e la lunghezza d'arco rimangono praticamente invariate, mentre la corrente di saldatura diminuisce. In tal modo, a meno che non si aumenti la tensione di saldatura sul generatore, il metallo d'apporto sarà depositato sotto forma di cordone di saldatura più stretto, con cresta del cordone più alta (più a "schiena di asino") e con una minore penetrazione.

Aumentando lo stick-out, per mantenere costante la corrente, dovrà essere aumentata la velocità di alimentazione del filo; sono quindi raccomandabili grossi stick-out nelle saldature ove vi siano da effettuare grossi depositi.

Lo stick-out ha influenza anche sulla forma del cordone e sulla fluidità del

bagno di fusione: una sua diminuzione determina un allargamento del cordone ed un aumento della fluidità del bagno, migliorando il raccordo del sovra-spessore. L'aumento dello stick-out allontana la torcia dalla zona di lavoro, riducendo il rischio di eventuali spruzzi causino l'otturazione degli ugelli del gas e l'ostruzione del guida-filo. In ogni caso, tale sporgenza, non deve essere troppo grande altrimenti si possono verificare serpeggiamenti del filo, una non completa penetrazione del bagno, ed inoltre, data la lontananza della torcia dalla zona di lavoro, un consumo eccessivo di gas.

Lo stick-out maggiormente adoperato é generalmente compreso fra 6 e 13 mm per il regime short-arc e tra 13 e 25 mm per gli altri tipi di trasferimento di metallo.

2.1.6. POSIZIONE DELLA TORCIA RISPETTO ALL' ASSE DI SALDATURA

Come per tutti i processi di saldatura ad arco, la posizione dell'elettrodo rispetto al giunto di saldatura influenza la forma e la penetrazione del cordone di saldatura. Tale influenza sulla forma del cordone e sulla penetrazione é di entità maggiore rispetto a quella esistente da parte della tensione d'arco o dalla velocità di avanzamento della torcia. La posizione dell'elettrodo é definita in due modi:

1. Dall'angolo compreso tra l'asse dell'elettrodo e la direzione di spostamento della torcia (angolo di spostamento) - *Fig 2.6*;
2. Dall'angolo compreso tra l'asse dell'elettrodo e la superficie di lavoro

adiacente (angolo di lavoro) – Fig. 2.7;

Quando l'elettrodo é inclinato nello stesso verso dello spostamento della torcia e, quindi, quando l'elettrodo punta nella direzione opposta a quella di spostamento della torcia, la tecnica é chiamata '*tecnica a tirare*'.
Quando l'elettrodo punta nella direzione di spostamento della torcia, la tecnica, é chiamata '*tecnica a spingere*'. La posizione dell'elettrodo ed i suoi effetti sulla larghezza e sulla penetrazione della saldatura, sono illustrati nella Fig. 2.6.

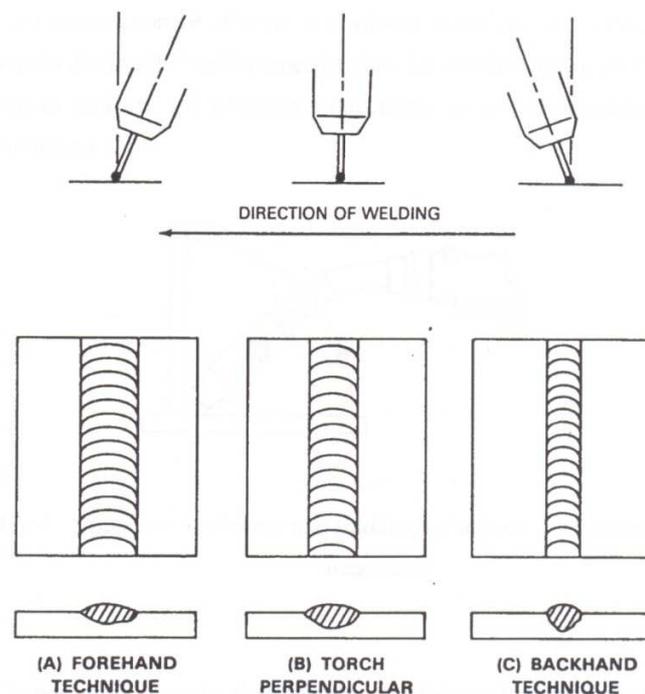


Fig.6 - Effetto della posizione dell 'elettrodo sulla forma del cordone di saldatura

Quando la posizione dell'elettrodo cambia da una posizione perpendicolare ad una posizione corrispondente ad una tecnica a spingere, rimanendo costanti tutte le altre condizioni, la penetrazione diminuisce ed il cordone di saldatura diventa più largo e più piatto.

La massima penetrazione é ottenuta in posizione piana con una tecnica a tirare con un angolo di circa 25° dalla perpendicolare. La tecnica a tirare produce anche un cordone di saldatura più convesso e più stretto, un arco più stabile, e minori spruzzi sul pezzo.

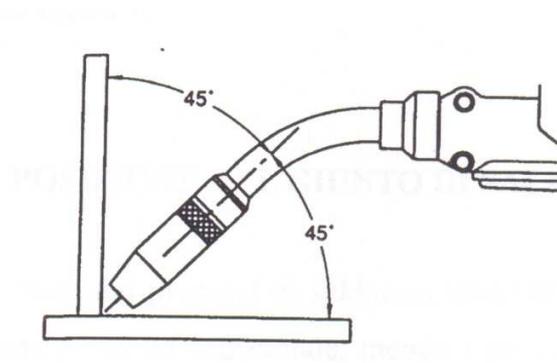


Fig. 7 - Angolo di lavoro per una saldatura d'angolo in posizione orizzontale

Per tutte le posizioni, l'angolo di spostamento dell'elettrodo normalmente usato è un angolo corrispondente alla tecnica a tirare compreso fra i 5 ed i 15 gradi; questo determina un buon controllo dell'arco ed una buona protezione del bagno di fusione ancora liquido.

Per alcuni materiali, come l'alluminio, una tecnica a spingere é preferita. Questa tecnica determina una '*azione pulente*' sulla zona antistante il metallo di saldatura fuso, che favorisce la bagnabilità e riduce l'ossidazione del metallo base.

La distanza della torcia dal giunto, influenza la penetrazione della saldatura. Infatti un generatore é fatto in modo tale da fornire sempre lo stesso valore di tensione impostato, per cui un allontanamento della torcia dal giunto fa aumentare lo stick-out, con un conseguente aumento della resistenza ed una diminuzione della corrente ($I=V/R$). tale diminuzione di corrente determina

appunto la diminuzione di penetrazione. Un discorso analogo può essere fatto per un avvicinamento della torcia, che determinerà un aumento della penetrazione.

Nelle saldature d'angolo in posizione orizzontale, l'elettrodo dovrebbe essere posizionato a 45° rispetto alla membratura verticale (angolo di lavoro) come illustrato nella figura 7.

2.1.7. POSIZIONE DEL GIUNTO DI SALDA TURA

La maggior parte dei processi di saldatura G.M.A.W in regime spray sono utilizzati in posizione piana od orizzontale, mentre i processi G.M.A.W in regime pulsato o cortocircuitato, avendo livelli energetici più bassi, possono essere usati in tutte le posizioni.

Le saldature d'angolo (fillet weld) fatte in posizione piana con un regime spray sono generalmente più uniformi, raramente hanno lembi laterali diseguali e profili convessi e sono meno sensibili alle incisioni marginali rispetto a quelle

fatte in posizione orizzontale.

Per superare la forza di gravità che agisce sul metallo di apporto nelle posizioni di saldature verticali e soprastesta, sono usati generalmente diametri di elettrodo piccoli sia con un regime short-arc che con un regime spray pulsato. Diametri di elettrodo di 1.0 mm o 1.2 mm e anche più piccoli, sono i migliori per le saldature fuori posizione. n basso apporto termico permette alla zona fusa di solidificarsi rapidamente. Nella saldatura delle lamiere in posizione verticale ha generalmente un effetto positivo la saldatura discendente.

Quando la saldatura é fatta in posizione piana, l'inclinazione dell'asse di saldatura rispetto al piano orizzontale, influenzerà la forma del cordone di saldatura, la penetrazione e la velocità ottimale di avanzamento della torcia. Nella saldatura orbitale in posizione piana, il pezzo ruota sotto la torcia di saldatura e l'inclinazione é ottenuta dallo spostamento della torcia in entrambe le direzioni rispetto al punto morto superiore.

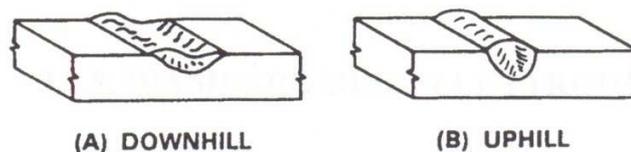


Fig.8 - Effetto della tecnica di saldatura discendente o ascendente sulla forma del cordone di saldatura

Posizionando il giunto con l'asse di saldatura a 15° sull'orizzontale e saldando in modo discendente, il sovrametallo può essere diminuito nelle stesse

condizioni di saldatura che produrrebbero un cordone non ben raccordato e con eccessivo sovrametallo quando il pezzo é in posizione piana. Con la saldatura discendente é possibile anche aumentare la velocità. Allo stesso tempo la penetrazione diminuisce, cosa gradita nelle saldature delle lamiere di metallo, figura 8 a.

La saldatura discendente influenza la forma del cordone e la penetrazione della saldatura, come mostrato nella figura 8 a. Il bagno di fusione tende ad essere trascinato dall'elettrodo e preriscalda, particolarmente in superficie, il metallo base. Questo produce una forma irregolare di zona fusa, chiamata "*scia secondaria*". Se l'angolo di inclinazione della asse di saldatura aumenta, il cordone di saldatura diventa più piano, la penetrazione diminuisce, e la larghezza

del cordone di saldatura aumenta. Per l'alluminio, la tecnica discendente non é raccomandabile, data la perdita dell'azione pulente e l'inadeguata protezione. La saldatura ascendente influenza la forma della zona fusa e del cordone di saldatura come illustrato nella figura 8 b. Le forze di gravità fanno fluire all'indietro il bagno di fusione che resta completamente dietro l'elettrodo. I bordi della saldatura perdono metallo, che fluisce al centro. Se l'angolo di inclinazione aumenta, il sovrametallo e la penetrazione aumenta, e l'estensione della saldatura diminuisce. Gli effetti sono esattamente gli opposti di quelli prodotti dalla saldatura discendente. Quando vengono usate correnti di saldatura più alte, il valore massimo dell'angolo utilizzabile diminuisce.

2.1.8. DIAMETRO DELL'ELETTRODO

Il diametro dell'elettrodo influenza la forma del cordone di saldatura. Un elettrodo più grande richiede una corrente minima più alta rispetto ad un elettrodo più piccolo, al fine di ottenere le stesse caratteristiche del trasferimento del metallo. Correnti più alte producono una fusione dell'elettrodo maggiore, depositi di saldatura più larghi e più fluidi, tassi di deposizione più alti e

penetrazioni maggiori.

Comunque, le saldature verticali e sopratesta sono generalmente fatte con diametri minori e correnti più basse.

L'influenza sulla saldatura del tipo di elettrodo utilizzato verrà maggiormente analizzata successivamente nel paragrafo relativo agli articoli di consumo dell'equipaggiamento.

2.1.9. PUNTO DI COLLEGAMENTO DEL MORSETTO DI MASSA

La scelta opportuna del punto di collegamento del morsetto massa é uno dei rimedi per ridurre od eliminare il fenomeno del "*soffio magnetico*" e le relative conseguenze. Il soffio magnetico é definito come quel fenomeno che determina una deviazione dell'arco elettrico causato dai campi magnetici che si generano nel pezzo ad opera della corrente di saldatura. Questo fenomeno é più intenso in corrente continua che in corrente alternata e può raggiungere intensità tali da compromettere l'esecuzione della saldatura facendo perdere il controllo della fusione e generando molti spruzzi. Si presenta più frequentemente alle estremità

del pezzo.

Altri metodi per diminuire l'effetto del soffio magnetico sono:

1. tenere l'arco corto
2. operare, ove possibile, in corrente alternata
3. limitare l'intensità di corrente
4. aggiungere al pezzo dei talloni di estremità (si spostano le estremità del pezzo in maniera fittizia).

2.2 EQUIPAGGIAMENTO

Il processo GMA W può essere usato sia in versione semiautomatica, sia in versione automatica. L'equipaggiamento base per una generica applicazione di un impianto G.M.A.W. é costituito da:

- . Una torcia di saldatura (raffreddata ad aria o ad acqua)
- . Un'unità di alimentazione del filo
- . Centralina di controllo dei parametri di saldatura
- . Un generatore di corrente
- . Un riduttore di pressione ed una bombola contenente il gas di protezione
- . Bobina di filo continuo costituente l'elettrodo

- . Cavi e tubi di collegamento
- . Sistema di circolazione dell'acqua (per le torce raffreddate ad acqua)

Nel capitolo dedicato all'impianto ,che è stato messo a punto presso il laboratorio del D.P.G.I. della facoltà di ingegneria dell'università Federico II di Napoli, verranno descritti dettagliatamente i componenti da noi scelti per la sperimentazione.

2.2.1 TORCIA DI SALDATURA

Sono state progettate diverse torce di saldatura per ottenere la massima efficienza nelle più svariate applicazioni. Queste vanno dalle torce per lavori pesanti (heavy duty) ad elevate correnti o per lavori di alta produzione, a torce leggere per basse correnti o per saldature fuori posizione.

Sia per le torce heavy duty e sia per quelle standard sono disponibili raffreddamenti ad aria o ad acqua e lance curve o diritte. Una torcia raffreddata ad aria avente lo stesso amperaggio nominale e lo stesso ciclo di lavoro é generalmente più pesante rispetto ad una torcia raffreddata ad acqua, dato che la prima ha bisogno di una massa maggiore per ovviare alla più bassa efficienza di raffreddamento. Il raffreddamento ad acqua, riuscendo a mantenere la temperatura della torcia ad un valore più basso, riduce il problema dell'adesione degli spruzzi sull 'ugello gas.

I componenti principali di una torcia di saldatura sono:

1. Il guida-filo (tubo di contatto o estremità di contatto)
2. L'ugello per il gas di protezione
3. La guaina guida-filo
4. L'attacco per il gas di protezione
5. L'attacco per l'acqua di raffreddamento
6. Il cavo per l'alimentazione elettrica
7. L'interruttore di comando

Questi componenti sono illustrati schematicamente nella figura 9.

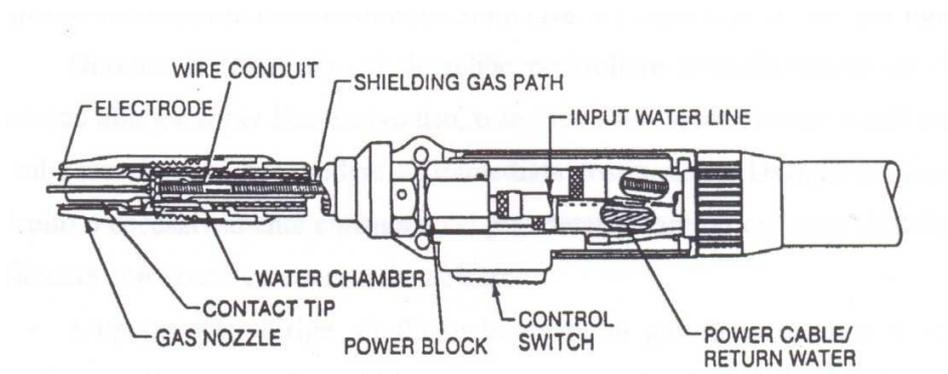


Fig.9- Spaccato di una torcia di saldatura GMA W

Il guida-filo: normalmente fatto di rame o di leghe di rame, trasferisce la corrente di saldatura all'elettrodo e direziona l'elettrodo nella zona di fusione. Esso é costituito da un semplice tubetto forato ed é collegato elettricamente alla saldatrice dal cavo di alimentazione elettrica. La superficie interna del foro del guida-filo deve essere ben levigata sia per far scorrere facilmente il filo sia per assicurare un buon contatto elettrico. Il libretto di istruzione allegato ad ogni torcia fornirà un elenco dei diametri del foro interno del guida-filo necessari per i diversi elettrodi utilizzati (in base al diametro ed al tipo di materiali dell'elettrodo). Generalmente, il foro nel guida-filo dovrebbe essere dai 0.13 mm a 0.25 mm più grande rispetto al diametro del filo usato, sebbene per l'alluminio generalmente é richiesto un foro più grande. Il guida-filo può essere realizzato in rame elettrolitico per le applicazioni standard o in lega di rame-cromo-zirconio per applicazioni heavy-duty.

Il guidafile deve essere fissato bene nella torcia, e deve essere centrato rispetto all'ugello del gas di protezione. Il posizionamento del guida-filo rispetto all'estremità dell'ugello é una variabile dipendente dal tipo di trasferimento che si desidera instaurare. Per il regime short-arc, generalmente sporge dall'ugello gas per una lunghezza variabile da 0 a 2 mm, mentre per il regime spray-arc é approssimativamente retratto di circa 3 mm (1/8 in) rispetto al bordo dell'ugello.

Durante la saldatura si dovrebbe controllare periodicamente se il foro inizia ad allargarsi per l'eccessivo uso, o se inizia ad essere ostruito dagli spruzzi; in tal caso si dovrà provvedere all'immediata sostituzione. Usando un guida-filo ostruito o eccessivamente consumato si può determinare un contatto elettrico non efficiente con elevate caratteristiche dell'arco.

L'ugello gas: dirige un flusso laminare di gas di protezione a sezione

circolare nella zona di saldatura. Un flusso laminare non turbolento è estremamente importante per assicurare una protezione adeguata del metallo di saldatura fuso, e renderlo privo di contaminazione atmosferica.

Sono disponibili diverse forme e dimensioni di ugello che sono scelte in funzione delle specifiche applicazioni; ad esempio un ugello più largo per lavorare con correnti elevate e con bagni di fusione di grandi dimensioni; ugelli più piccoli per correnti più basse e saldature in regime di short-arc. Per l'applicazione di saldature a punti gli ugelli sono dotati di feritoie che permettono al gas di fuoriuscire quando l'ugello è schiacciato contro il pezzo da saldare.

Generalmente sia l'ugello che il guidafile sono perfettamente levigati onde evitare, o meglio ridurre, l'adesione degli spruzzi sulle relative superfici.

Sono disponibili, inoltre, ugelli raffreddati ad acqua attraverso la superficie di contatto degli stessi con la lancia di saldatura o attraverso un circuito di raffreddamento secondario, o ancora, degli ugelli gas di protezione addizionali che possono essere richiesti per proteggere maggiormente il bagno di fusione nelle saldature ad elevata velocità di spostamento o nella saldatura di metalli fortemente ossidabili.

La guaina guida-filo: è collegata al gruppo di alimentazione filo. La guaina supporta, protegge e guida l'elettrodo dalla bobina di filo alla torcia fino ad arrivare al guida-filo. E' necessaria una alimentazione continua e costante dell'elettrodo per assicurare una buona stabilità dell'arco, e deve essere anche evitata una curvatura del filo. Se l'elettrodo non è opportunamente guidato, facilmente potrà incastrarsi tra il gruppo di alimentazione ed il guida-filo.

Il tipo di materiale di cui è costituita la guaina influenza in misura notevole il funzionamento della stessa.

Quando si usano fili costituiti da materiale duro, come acciaio e rame, è raccomandata una guaina metallica elicoidale in acciaio. Nel caso di elettrodi di materiale tenero, come l'alluminio ed il magnesio, è raccomandata una guaina in teflon o teflon grafitato. Nel caso in cui si saldi alluminio o magnesio ad elevati valori di corrente, è preferibile utilizzare guaine con terminali in rame.

Bisogna fare attenzione a non piegare o curvare eccessivamente la guaina, anche se la superficie esterna è generalmente rinforzata con una elica di acciaio. Il manuale di istruzione fornito con ogni unità generalmente fornisce un elenco di guaine e rivestimenti per ogni materiale e diametri di elettrodo.

Fascio cavi: I rimanenti elementi presenti nel fascio cavi della torcia servono per fornire il gas di protezione, l'acqua di raffreddamento e la corrente alla torcia. Questi elementi possono essere collegati o direttamente alle rispettive sorgenti o ad una centralina di controllo dei parametri di saldatura.

L'interruttore: serve per avviare ed arrestare la saldatura; con una 18 pressione si determina l'apertura, generalmente anticipata, dell' elettrovalvola del gas, la chiusura del interruttore montato nel generatore di corrente e la partenza del motorino per l'alimentazione del filo. L'interruttore deve essere rilasciato una volta che si è instaurato l'arco. Con una 28 pressione si arresta l'operazione di saldatura, e si determina una chiusura posticipata del gas di protezione.

2.2.2. GRUPPO DI ALIMENTAZIONE DEL FILO

Il gruppo di alimentazione dell'elettrodo (alimentatore di filo) é costituito da un motorino elettrico, a 2 o 4 rullini di alimentazione, e da diversi elementi che servono per assicurare l'allineamento dell'elettrodo tra i rullini. Questa unità può essere integrata con il sistema di controllo (comando) della velocità del filo od essere separata.

Il motorino di alimentazione dell'elettrodo generalmente é di tipo a corrente continua. Esso, tramite i rullini, spinge l'elettrodo attraverso la guaina ed il guida-filo nel bagno di fusione. Generalmente il sistema é corredato di un circuito di controllo che permette di variare la velocità del motorino su di un campo sufficientemente ampio (1.8 m/min - 18 m/min. oppure 1-10 m/min. oppure 3.5 m/min - 35 m/min.).

In combinazione con un generatore a tensione costante normalmente é usato un alimentatore di filo a velocità costante. Nel caso si utilizzi un generatore a corrente costante o meglio a tensione cadente con velocità dell'elettrodo non troppo alte, si può utilizzare un alimentatore a velocità variabile. In tal caso si usa un sistema di controllo automatico sensibile alla tensione d'arco. Questo sistema rileva i cambiamenti della tensione d'arco e regola la velocità di alimentazione del filo in modo tale da mantenere un arco di lunghezza costante. Questa combinazione di velocità di alimentazione del filo variabile ed un generatore a corrente costante é limitata ai diametri di elettrodo più grandi (1.2 mm - 1.6 mm) dove appunto le velocità di alimentazione del filo sono più basse.

A velocità di alimentazione del filo più alte, tale tipo di regolazione non riesce generalmente ad essere tanto veloce da mantenere la stabilità dell'arco; questo é dovuto alle inerzie meccaniche del gruppo di alimentazione. Tali sistemi non possono funzionare con i procedimenti in short-arc, dato che la tensione di saldatura varia continuamente.

Il motorino di alimentazione é collegato a dei rullini di guida che trasmettono una forza di trascinamento all'elettrodo necessaria per tirarlo dalla bobina di filo e per spingerlo attraverso la guaina passa-filo e la torcia. La regolazione della pressione dei rullini di guida permette di variare la forza che deve essere applicata al filo, dipendendo questa dalle caratteristiche del filo da alimentare (pieno o animato, duro o tenero). L'unità di alimentazione del filo può essere costituita da 2 o da 4 rullini e più raramente da 6 rullini. Una classica unità a 4 rullini é mostrata nella *Fig 2.10*.



Fig. 2.10 - Unità di alimentazione del filo a 4 rullini

Le guide di ingresso e di uscita consentono un opportuno allineamento del filo tra i rullini di guida, ed aiutano a prevenire una piegatura del filo.

I tipi di rullini generalmente usati con fili pieni é mostrato in *Fig.2.10* dove un rullo scanalato é accoppiato ad uno liscio non scanalato.

Una scanalatura a 'V' viene usata per fili pieni e duri, come acciaio al carbonio ed inossidabili, mentre una scanalatura ad 'U' é usata per fili teneri, come l'alluminio. Rulli dentellati o zigrinati sono accoppiati per fili animati.

La zigrinatura permette di trasmettere la massima forza di spinta al filo, con la minima pressione applicata tra i rullini.

Questi tipi di rullini non sono raccomandati per fili teneri, come l'alluminio, dato che i rullini tendono a danneggiare il filo causando una eventuale ostruzione nella torcia o nella guaina, o generando dei trucioli di metallo che tendono ad occludere la guaina od il guidafile.

2.2.3. CENTRALINA DI CONTROLLO

La centralina di controllo ed il sistema per l'alimentazione dell'elettrodo sono contenuti, nelle operazioni semiautomatiche, in un unico box. La funzione principale della centralina di controllo é quella di regolare la velocità del motorino di alimentazione dell'elettrodo, generalmente attraverso l'uso di un potenziometro. Aumentando la velocità di alimentazione dell'elettrodo l'operatore aumenta la corrente di saldatura. Diminuendo la velocità di avanzamento dell'elettrodo si otterrà una diminuzione della corrente di saldatura. L'apparecchio regola anche la partenza e l'arresto dell'alimentazione dell'elettrodo attraverso un segnale ricevuto dall'interruttore posto sulla torcia di saldatura. Sono disponibili particolari sistemi di alimentazione dell'elettrodo che permettono una partenza a tocco '*touch-start*' (l'alimentazione dell'elettrodo parte quando l'elettrodo tocca il pezzo).

Normalmente il gas di protezione, l'acqua di raffreddamento e la corrente di saldatura prima di essere collegati alla torcia vengono deviati in tale apparecchiatura. il flusso di acqua e gas sono regolati per partire ed arrestarsi contemporaneamente alla partenza ed all'arresto della saldatura, tramite l'uso di una valvola solenoide. Altro compito del sistema di controllo é quello di arrestare automaticamente la saldatura nel caso in cui si presenti qualunque anomalia (mancanza di acqua di raffreddamento, di gas). il gruppo di alimentazione filo é generalmente alimentato da corrente alternata indipendente.

Sui gruppi di alimentazione più evoluti è possibile, inoltre, gestire i parametri di funzionamento di un gruppo in maniera da ottenere delle funzioni di controllo

particolarmente utili; elenchiamo qui di seguito le più importanti, facendo riferimento ad un impianto di saldatura costituito da un generatore di corrente a tensione costante e da un gruppo trascina-filo a velocità costante dotato di valvola gas di protezione:

- **PREPURGE** :(SPURGO GAS) e' il tempo, selezionabile da potenziometro, che intercorre tra l'istante in cui il saldatore preme il pulsante posizionato sulla torcia e la chiusura del contattore che fornisce tensione alla torcia e che contemporaneamente fa partire il gruppo trascinabile. Per tutta la durata di tale tempo il saldatore rimane con la torcia in posizione fissa pronto per saldare, con il gas che fuoriesce dall'ugello spurgando tutto il circuito da eventuale aria presente.
- **HOT START** : se tale funzione e' selezionata o prescelta, nel momento in cui il contattore si chiude per dare tensione alla torcia e per alimentare il

gruppo trascinamento-filo, il generatore fornisce il valore massimo di tensione erogabile, in maniera da favorire l'innesco dell'arco. Un istante dopo l'avvenuta accensione dell'arco la tensione si porta al valore di saldatura prescelto a mezzo di un apposito potenziometro sul gruppo di alimentazione stesso.

- **RUN IN** : se tale funzione è preselezionata o prescelta, nell'istante in cui l'arco si innesca, l'impianto di saldatura inizia a saldare con una tensione d'arco ed una velocità di alimentazione del filo diversi dai valori impostati per la saldatura del giunto, il tutto per un tempo programmabile. Scaduto tale tempo i parametri di saldatura diventano quelli impostati come parametri di saldatura a regime.

Tale funzione serve ad evitare l'ottenimento di cordoni di saldatura "freddi" nella parte iniziale del cordone, nella saldatura di metalli ad elevata conducibilità termica (alluminio, rame, ecc.), nella saldatura di metalli di grosso spessore o nella realizzazione di giunti di qualità.

- **CRATER FILL** : una volta terminata la saldatura, il saldatore preme di nuovo l'interruttore per spegnere l'arco se lavora con un gruppo di alimentazione filo standard. L'arco di saldatura spegnendosi istantaneamente, genera un "cratere" dovuto alle forze magnetiche dell'arco ed al bombardamento ionico dello stesso. Tale cratere costituisce un difetto grave dal punto di vista della qualità del giunto. Se tale funzione

è prelezionata accade che quando il saldatore preme il pulsante torcia per spegnere l'arco, lo stesso non si spegne, continuando a funzionare con una tensione ed una velocità del filo prelezionate e diverse dai valori di saldatura, ed in particolare con valori nettamente più bassi, in maniera da riuscire a riempire il cratere finale. Tale nuovo arco di saldatura rimarrà acceso per un tempo programmabile

- **BURN BACK** : se tale funzione non viene utilizzata accade che quando il saldatore preme per la seconda volta il pulsante per spegnere l'arco, o quando scade il tempo preimpostato per il Crater Fili, vengono disattivati contemporaneamente sia il contattore che fornisce tensione all'arco e sia il gruppo che alimenta il filo di apporto. In tali condizioni di spegnimento dell'arco può accadere che il filo rimanga impuntato nel bagno di fusione solidificato. Può inoltre succedere che alla estremità del filo si formi una piccola sfera di metallo fuso; tale sfera risulta essere fortemente dannosa per la qualità della saldatura, perché può generare problemi di accensione

Non affidabile o problemi di spallinatura durante l'accensione dell'arco successivo. Per evitare ciò è possibile impostare un tempo di burn back che consiste nel ritardare la chiusura del contattore del generatore rispetto alla disattivazione del gruppo trascinafilo in maniera da ottenere che il filo si fermi con l'arco ancora acceso per un tempo impostabile detto appunto burn back.

- **POST -FLOW** : se tale funzione è preselezionata o prescelta, il gas continua ad uscire dall'ugello gas per un tempo preselezionato dopo che il saldatore ha premuto nuovamente l'interruttore per interrompere la saldatura, in maniera da permettere al bagno di fusione di potersi raffreddare sotto protezione gassosa.

Tali funzioni risultano essere tanto più importanti quanto più è elevata la qualità richiesta dal giunto, quanto maggiore è la conducibilità termica del metallo da saldare e quanto maggiore è la reattività o la ossidabilità del metallo base.

2.2.4. GENERATORE DI CORRENTE

Il generatore di corrente di saldatura fornisce l'energia elettrica necessaria per innescare e mantenere stabile l'arco tra l'elettrodo ed il metallo base. Per la maggior parte dei processi di saldatura G.M.A.W. è utilizzata una corrente continua con elettrodo positivo; per cui il polo positivo è collegato alla torcia e quello negativo al metallo base. I principali generatori di corrente continua sono costituiti da "generatori di corrente rotanti mossi da motori elettrici" (macchine

rotanti) "generatori di corrente rotanti mossi da motori a combustione interna" (motosaldatrici) e "trasformatori più raddrizzatori statici" (macchine statiche).

Tra la categoria delle macchine statiche è incluso anche il tipo di saldatrice inverter. Il trasformatore più raddrizzatore statico è generalmente preferito per le

lavorazioni in fabbrica, dove sono generalmente disponibili tensioni di 220 o 380 V (230 o 460V in America). Esso risponde più velocemente ai cambiamenti delle condizioni dell'arco rispetto alle macchine rotanti. Le motosaldatrici sono usate quando non é disponibile alcuna sorgente di energia elettrica, come ad esempio in un cantiere all'aperto.

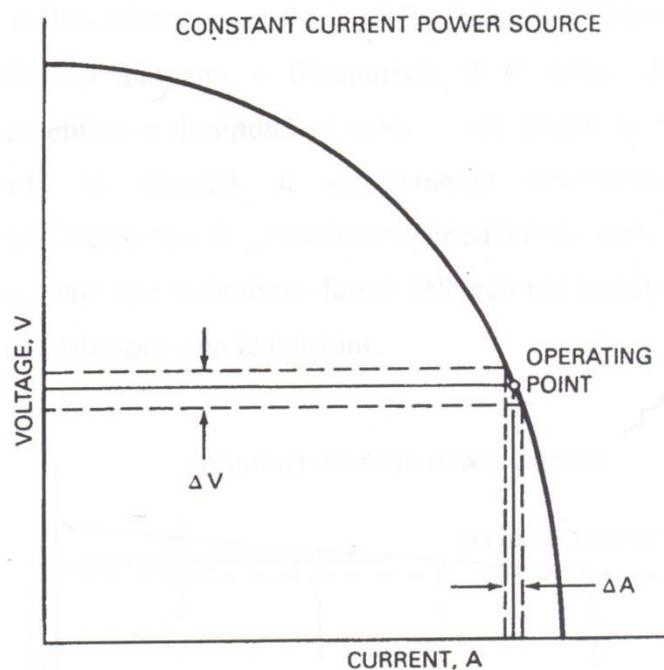


Fig.2.11 -Caratteristica Volt-Ampere per un generatore a tensione cadente o a corrente costante

Entrambi i tipi di generatori possono essere progettati e costruiti per fornire sia una corrente costante che una tensione costante. Inizialmente le

applicazioni dei processi G.M.A.W. usavano generatori con corrente costante o tensione cadente (spesso detti "droopers").

I droopers mantengono un livello di corrente relativamente costante durante la saldatura, non tenendo conto delle variazioni della lunghezza d'arco, come illustrato in *Fig.2.11*.

Queste macchine sono caratterizzate da un valore della tensione a vuoto elevata, e da un valore della corrente di corto circuito limitata. Dato che essi forniscono una corrente praticamente costante, con una velocità di alimentazione dell'elettrodo costante, l'arco manterrà una lunghezza costante solo se la distanza tra il guida-filo ed il metallo base rimane costante. In pratica, dato che questa distanza varierà, l'arco allora tenderà ad allungarsi, avvicinandosi al guida-filo, o ad accorciarsi, generando un impuntamento del filo nel bagno di fusione.

Questo può essere evitato, come già visto, usando un sistema di alimentazione dell'elettrodo controllato dalla tensione. Quando la tensione (lunghezza dell'arco) aumenta o diminuisce, il motorino di alimentazione dell'elettrodo aumenterà o diminuirà la velocità per tenere la lunghezza d'arco costante. Quindi, la velocità di avanzamento dell'elettrodo è regolata automaticamente. Questo tipo di generatore è generalmente usato per saldatura in regime spray-arc, dato che la limitata durata dell'arco nel regime short-arc rende impraticabile la regolazione con la tensione.

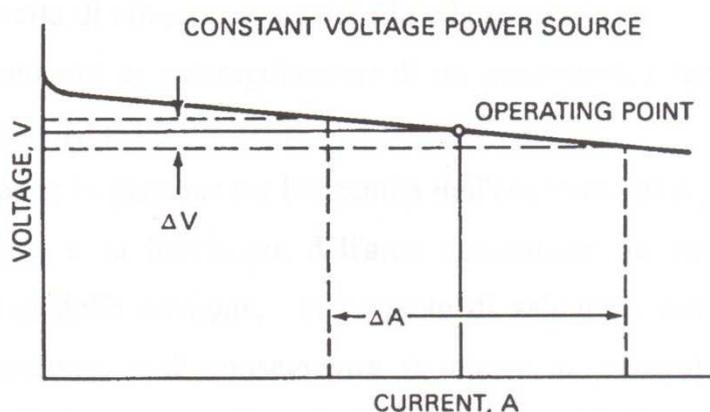


Fig.2.12 -Caratteristica Volt-Ampere per un generatore a tensione costante

Con lo sviluppo delle applicazioni G.M.A.W. si é visto che un generatore a tensione costante riesce a migliorare le condizioni di saldatura. Usato in unione ad una velocità di alimentazione del filo costante, esso mantiene una tensione quasi costante durante la saldatura. La curva volt-ampere di questo tipo di generatore é mostrata in *Fig.2.12*.

Con l'utilizzo di un generatore a tensione costante, a seguito di una variazione della distanza tra le estremità dell'elettrodo ed il giunto di saldatura (fenomeno che avviene di norma durante una operazione di saldatura) il generatore risponderà con un istantaneo aumento o diminuzione della corrente di saldatura, variazione che determinerà una variazione dello stick-out a compensazione della variazione della distanza tra il guida-filo ed il pezzo da saldare.

La lunghezza dell'arco é stabilita dalla regolazione della tensione di saldatura al generatore. Una volta che questa é stata selezionata, non sono richiesti altri cambiamenti durante la saldatura. La velocità di alimentazione del filo, che costituisce anche il controllo della corrente, é preselezionata dal saldatore o dal tecnico di saldatura prima di iniziare la saldatura. Essa può essere variata in un ampio campo i cui estremi determinano l'impuntamento del filo o la fusione all'interno del guidafile.

Il saldatore o il tecnico di saldatura apprenderanno, in tal maniera ,come regolare la velocità di alimentazione del filo e la tensione.

Il meccanismo di autoregolazione di un generatore a tensione costante è illustrato in *Fig.2.12* e *2.13*.

Non appena la distanza tra l'estremità dell'elettrodo ed il pezzo aumenta la tensione dell'arco e la lunghezza dell'arco aumentano; in corrispondenza del limitato aumento della tensione, la corrente di saldatura diminuirà in misura

notevole e istantanea e di conseguenza si otterrà un aumento dello stick-out dovuto ad una diminuzione della velocità di fusione del filo; viene in tal modo ripristinata la lunghezza d'arco di partenza. Viceversa, se la distanza tra l'estremità del filo ed il bagno di fusione viene diminuita, la piccola diminuzione di tensione causerà un notevole ed istantaneo aumento della corrente che determinerà una diminuzione dello stick-out.

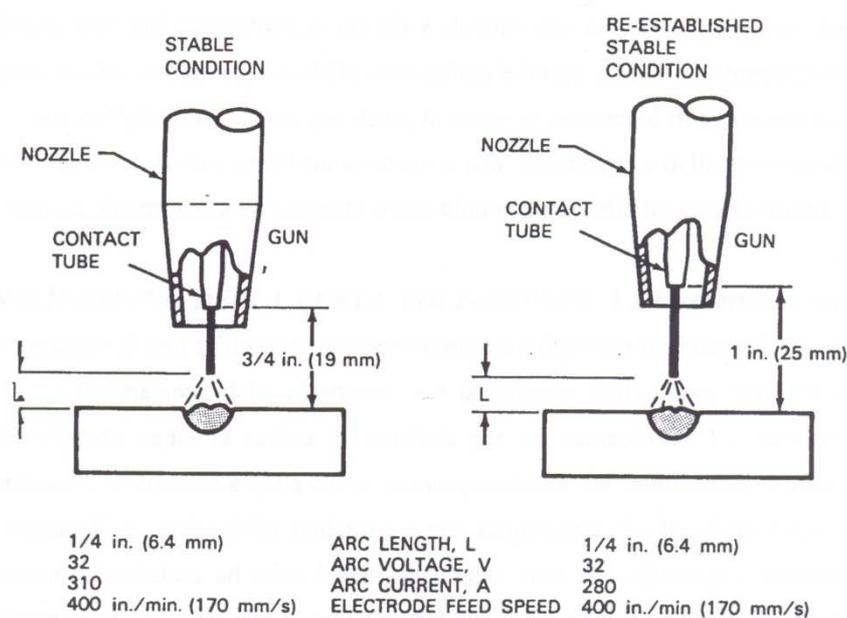


Fig. 2.13 -Regolazione automatica della lunghezza d'arco in un processo di saldatura G.M.A.W.

La caratteristica di autoregolazione della lunghezza d'arco del generatore a tensione costante é importante per ottenere condizioni di saldatura stabili, ma ci sono altre variabili che contribuiscono all'ottimizzazione delle performance di saldatura, principalmente se si salda con trasferimento cortocircuitato short-arc.

In aggiunta al controllo della tensione di uscita possono essere molto utili la possibilità di variare l'inclinazione delle curve volt-ampere ed il valore dell'induttanza. Ogni saldatore o tecnico di saldatura, dovrebbe conoscere gli effetti di queste variabili sull'arco di saldatura e sulla sua stabilità. Analizziamo allora dettagliatamente questi parametri:

- **TENSIONE D'ARCO:** la tensione d'arco é il potenziale elettrico tra l'elettrodo ed il metallo base. La tensione d'arco é piú bassa della tensione misurata direttamente sul generatore, e questo é dovuto alle cadute di tensione che si verificano in corrispondenza delle connessioni e lungo i cavi di alimentazione di corrente dell'elettrodo. Come già detto, la tensione dell'arco é direttamente legata alla lunghezza d'arco; perciò un aumento o una diminuzione della tensione della saldatrice, determinerà un aumento o una diminuzione della lunghezza d'arco.
- **INCLINAZIONE DELLA CURVA VOLT-AMPERE:** La caratteristica statica volt-ampere di una saldatrice a tensione costante é illustrata in figura 15. L'inclinazione della caratteristica é la tangente della curva V / I ed é data normalmente come la caduta di tensione per un aumento di 100 ampere di corrente. L'inclinazione della curva, come specificato dal fabbricante, é misurata ai terminali di uscita della saldatrice e non rappresenta l'inclinazione totale del sistema di saldatura ad arco. Infatti qualunque cosa che aggiunge resistenza al sistema di saldatura (per es.: cavi elettrici, cattive connessioni elettriche, perdite terminali, contatti sporchi, ecc.) aumenta tale inclinazione. Questa, quindi è meglio misurata in corrispondenza dell'arco in un sistema di saldatura dato.

Onde evitare una ulteriore caduta di tensione nel cavo di massa, è necessario adottare un cavo che abbia una sezione di almeno 1 mm² per ogni 4 ampere di corrente che lo attraversa.

Sono necessari due punti operativi per calcolare l'inclinazione di un tipo

di sistema di saldatura a potenziale costante, come mostrato in *Fig.2.14*.

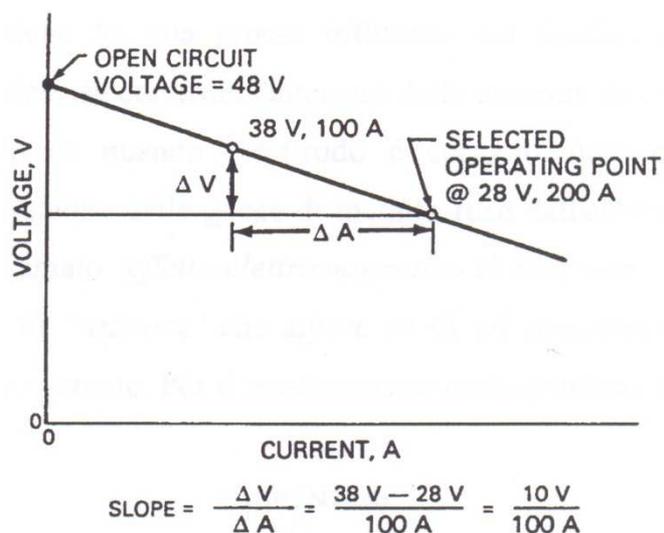


Fig. 2.14 -Calcolo dell 'inclinazione per un generatore a tensione costante

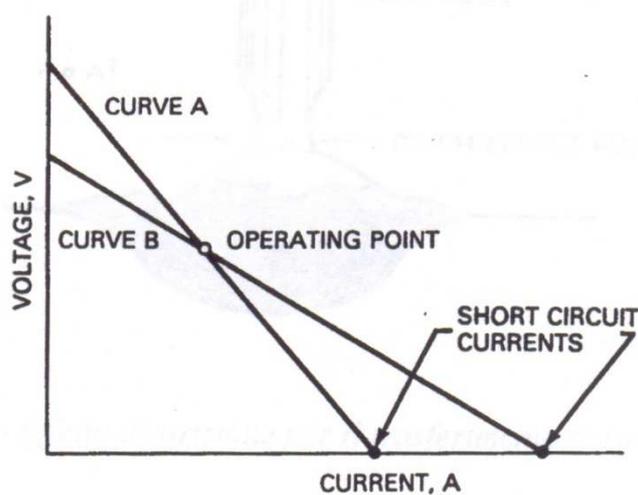


Fig. 2.15 -Effetto della variazione dell 'inclinazione della curva Volt-Ampere

Non é conveniente usare la tensione a vuoto come uno dei punti, a causa di una brusca caduta di tensione che si verifica a basse correnti con alcuni tipi di macchine, come mostrato in *Fig.2.15*. Dovrebbero essere scelte due condizioni di arco stabile a correnti opportune, cioè tali che siano comprese nel campo più probabilmente usato in pratica.

L'inclinazione ha una grossa influenza nel trasferimento short-arc del G.M.A.W. , nel quale essa controlla l'intensità della corrente di corto circuito cioè la corrente che circola quando l'elettrodo é cortocircuitato con il pezzo.

Nel G.M.A.W. , la separazione delle gocce di metallo fuso dall'elettrodo é governata da un fenomeno chiamato “effetto elettromagnetico di strizione”.

La strizione é una forza magnetica di 'strizione' che agisce su di un conduttore quando questo è attraversato dalla corrente. Per il trasferimento cortocircuitato l'effetto é illustrato in *Fig.2.16*.

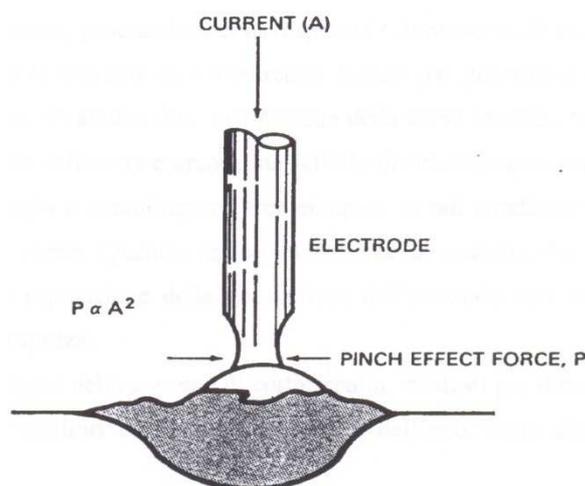


Fig. 2.16 -Effetto di strizione per il trasferimento cortocircuitato

La corrente di cortocircuito (e perciò la forza di strizione) è una funzione della pendenza della curva volt -ampere di una saldatrice, come mostrato in *Fig.2.15*.

Dalla stessa figura possiamo notare che la tensione e l'amperaggio del punto operativo dei due generatori sono uguali, ma la corrente di corto circuito della curva A è più bassa di quella della curva B. La curva A ha un'inclinazione più ripida cioè ha una caduta di tensione per 100 ampere maggiore rispetto alla curva B, quindi, una corrente di cortocircuito più bassa e un effetto di strizione più basso.

Nel trasferimento cortocircuitato l'ammontare della corrente di corto circuito è importante, dato che l'effetto di strizione risultante determina il modo in cui la goccia fusa si distacca dall'elettrodo. Questo, di conseguenza, influenza la stabilità dell'arco. Quando nella caratteristica esterna non c'è inclinazione, o quando esiste una piccola inclinazione, la corrente di corto circuito salirà rapidamente ad alti livelli. L'effetto di strizione sarà molto accentuato, e la goccia fusa si separerà violentemente dal filo. L'eccessivo effetto di strizione strizzerà repentinamente il metallo fuso interrompendo il corto circuito e facendo esplodere la goccia, generando eccessivi spruzzi e diminuendo la penetrazione.

Quando la corrente di cortocircuito fornita dal generatore di corrente è limitata, ciò dovuto ad una forte inclinazione della curva caratteristica, l'elettrodo sarà attraversato dall'intera corrente, ma l'effetto di strizione sarà troppo basso per separare la goccia e ristabilizzare l'arco elettrico; in tali condizioni l'elettrodo si impunterà sul pezzo. Quando, infine, la corrente di cortocircuito ha un valore

accettabile, la separazione della goccia fusa dall'elettrodo sarà uniforme e si avranno pochi spruzzi.

Valori tipici della corrente di cortocircuito, richiesti per il trasferimento di metallo nelle migliori condizioni di stabilità dell'arco, sono riportate qui di seguito:

Materiale	Diametro filo	Corrente Icc
Acciaio al carbonio	0.8 mm	300 A
Acciaio al carbonio	0.9 mm	320 A
Alluminio	0.8 mm	175 A
Alluminio	0.9 mm	195 A

Nel trasferimento spray l'inclinazione deve essere piccola, onde evitare una grossa fluttuazione della tensione durante l'autoregolazione dell'arco, rendendo l'arco instabile e non costante.

Molti generatori a tensione costante sono forniti di regolazione dell'inclinazione della curva caratteristica. Essi possono essere regolati in modo continuo o a gradini per fornire i valori desiderati della corrente di corto circuito nelle diverse applicazioni. Alcuni hanno un'inclinazione fissa, preselezionata per le più comuni condizioni di saldatura.

INDUTTANZA: Quando l'elettrodo cortocircuita il pezzo la corrente sale

rapidamente ad elevati valori.

La caratteristica del circuito elettrico che influenza la velocità di salita della corrente é l'induttanza, generalmente misurata in Henry.

L'effetto di induttanza é illustrato dalle curve mostrate in *Fig.2.17*. La curva A é un esempio di una curva tempo-corrente rilevata immediatamente dopo un corto circuito quando é presente nel circuito un'induttanza. La curva B rappresenta il percorso che la corrente avrebbe seguito se non ci fosse stata alcuna induttanza nel circuito.

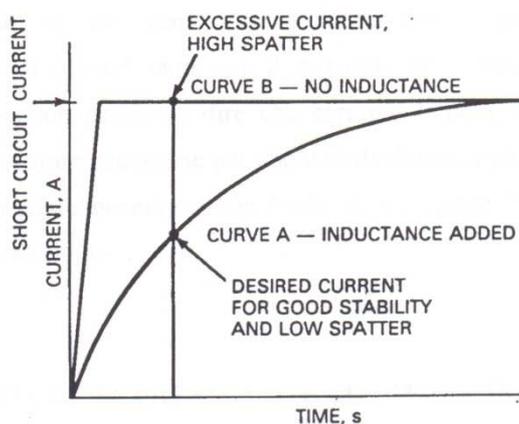


Fig.2.17 -Variazione della velocità di incremento della corrente in seguito all' aggiunta di induttanza nel circuito.

Il massimo valore dell'effetto di strizione é determinato dal valore finale della corrente di cortocircuito. Tale effetto varia la sua intensità al variare del valore della corrente e così la forma della curva tempo-corrente é molto importante.

L'induttanza, nel circuito, controlla la velocità di salita della corrente. Un circuito che non presenta induttanza é tale che l'effetto di strizione é applicato rapidamente e la goccia fusa sarà strizzata violentemente causando eccessivi spruzzi. Un'induttanza più alta (70-100%) determinerà una diminuzione degli spruzzi e della frequenza dei cortocircuiti ed un aumento del tempo di arco acceso che rende il bagno di fusione più fluido e genera un cordone di saldatura più piatto ed uniforme.

Nel trasferimento spray, l'aggiunta di induttanza al circuito del generatore, produrrà un innesco morbido dell'arco senza influenzare le condizioni stazionarie della saldatura e riducendo al minimo la spallatura iniziale. La percentuale di induttanza inserita deve essere però minima, onde evitare una eccessiva fluttuazione della tensione.

La regolazione del generatore, richiesta per ottenere saldature con presenza minima di spruzzi, varia con il materiale ed il diametro dell'elettrodo.

Come regola generale possiamo dire che correnti di cortocircuito più alte ed induttanze più alte sono necessarie per diametri di elettrodo più grandi.

Sono disponibili generatori con livelli di induttanza fissa o regolabili in modo continuo o a scalino.

2.2.5. RIDUTTORE DI PRESSIONE E CONTENITORE DEL GAS DI PROTEZIONE

Durante la saldatura é richiesto un sistema che assicuri un flusso di gas di protezione costante a pressione atmosferica.

Un riduttore di gas riduce la pressione di alimentazione del gas ad una pressione costante di lavoro, non considerando le variazioni che si possono verificare a monte dello stesso riduttore.

Il riduttore può essere ad uno o a due stadi e può avere un flussometro incorporato. I riduttori a due stadi forniscono gas ad una pressione più costante rispetto a quelli ad un singolo stadio. Se le saldature sono effettuate in ambienti molto freddi o in CO₂, é necessario montare a monte del riduttore un preriscaldatore onde evitare il congelamento del gas nell'espansione.

Il sistema contenente il gas di protezione può essere costituito da una bombola ad alte pressioni. Sono disponibili sia gas puri che miscele di gas in bombole singole. Per la miscelazione vengono usati dispositivi con i quali si riescono ad ottenere perfette proporzioni volumetriche.

La quantità di gas stoccato ed il tipo di gas sono scelti basandosi sui volumi di gas consumati mensilmente.

2.2.6. ELETTRODO

Il processo G.M.A.W. usa un elettrodo continuo che é consumato a velocità relativamente elevata e che viene prelevato da bobine su cui e' avvolto in modo uniforme, in quantità variabili da 0.5 a 25 kg, per permettere un'alimentazione libera, a velocità costante e senza “effetto d'elica”. Sono disponibili bobine più grandi che contengono anche più di 115 Kg di filo; il filo, inoltre, può essere fornito in fusti da 340 a 450 kg. I sistemi che montano la bobina sulla torcia utilizzano bobine da 0.45 -0.9 kg.

Le bobine possono essere posizionate in prossimità dell'alimentatore del filo o lontano da questo; in quest'ultimo caso, il filo verrà fornito mediante uno speciale equipaggiamento di distribuzione. Normalmente la bobina dovrebbe trovarsi quanto più vicino possibile alla torcia per minimizzare problemi di alimentazione, ma anche abbastanza lontano per dare flessibilità ed accessibilità alla saldatrice.

2.3. MATERIALI DI CONSUMO

In aggiunta ai componenti di equipaggiamento che si consumano e devono essere sostituiti, come il guidafile e la guaina guidafile, il processo G.M.A.W. contiene anche gli elettrodi ed i gas di protezione. La composizione chimica dell'elettrodo, del metallo base e del gas di protezione, determinano la composizione chimica del bagno di fusione, che influenza notevolmente le

proprietà meccaniche del gruppo saldato. I fattori che influenzano la selezione del gas di protezione e dell'elettrodo di saldatura sono i seguenti:

1. tipo di metallo base
2. proprietà meccaniche richieste al giunto saldato
3. condizioni di pulizia del metallo base
4. tipo di servizio o specifiche applicazioni richieste
5. posizione di saldatura
6. modalità di trasferimento del metallo desiderato

Analizziamo, ora, più da vicino sia gli elettrodi che il tipo di gas di protezione.

2.3.1. FILI-ELETTRODI

Alcuni enti hanno effettuato una classificazione dei diversi elettrodi esistenti in commercio, specificandone tutte le caratteristiche.

Sono state realizzate delle classificazioni anche dei metalli d'apporto per speciali applicazioni. Queste definiscono le dimensioni e le tolleranze, il tipo di imballaggio e di conservazione necessaria, la composizione chimica ed alcune proprietà meccaniche di ogni tipo di elettrodo.

Generalmente la composizione dell'elettrodo (metallo d'apporto) é simile a quella del metallo base. La composizione del metallo d'apporto può essere alterata per compensare le perdite che avvengono nella saldatura o per provvedere una disossidazione ed una degasazione del bagno di fusione. In alcuni casi questo richiede piccolissime modifiche rispetto alla composizione del metallo base.

In applicazioni particolari, comunque, per ottenere caratteristiche di saldatura soddisfacenti é richiesto un elettrodo con una diversa composizione chimica rispetto a quella del metallo base. Per esempio il materiale più soddisfacente per la saldatura G.M.A.W. di un bronzo al manganese, (una lega di rame e zinco) é un elettrodo costituito di bronzo all'alluminio o una lega di rame, manganese, nickel ed alluminio. Gli elettrodi più adatti per saldare le leghe di alluminio ad alta resistenza e le leghe di acciaio sono spesso diversi dal metallo base. Questo succede perché alcune leghe di alluminio non hanno un buon comportamento come materiale di apporto. Si utilizzano, invece, leghe atte a produrre le proprietà meccaniche desiderate e che diano caratteristiche operative accettabili.

Le modifiche fatte sulla composizione dell'elettrodo, aggiungendo deossidanti o altri elementi degasanti, sono fatte per minimizzare la porosità della saldatura o per assicurare proprietà meccaniche del metallo di saldatura soddisfacenti.

L'aggiunta di appropriati disossidanti in una giusta quantità, é essenziale per la produzione di una saldatura solida. I disossidanti più comuni usati negli elettrodi di acciaio sono manganese, silicio, alluminio; per gli elettrodi in lega di

nickel sono usati il titanio ed i silicio; per gli elettrodi in lega di rame sono usati il titanio, il silicio, il fosforo.

Gli elettrodi usati per il G.M.A.W. sono abbastanza più piccoli di diametro rispetto a quelli usati per la saldatura ad arco sommerso o per la saldatura in filo animato. Sono comuni diametri di elettrodo che vanno da 0,8 a 1,6 mm; in ogni caso possono essere usati diametri di elettrodo più piccoli (0.5 mm) o più grandi (3.2 mm). I diametri più comuni che troviamo in commercio sono: 0.8 - 1.0 - 1.2 - 1.6 - 2.4 mm.

Il diametro deve essere quanto più regolare possibile per non dare problemi di alimentazione.

Dato che le dimensioni dell'elettrodo sono piccole e le correnti relativamente alte, le velocità di avanzamento del filo devono essere elevate.

Il campo di variazione va approssimativamente dai 40 ai 340 mm/sec. Per molti metalli escluso il magnesio, dove possono essere necessarie velocità di 590 mm/sec. Per tali velocità del filo, gli elettrodi sono opportunamente temperati .

Tali fili possono essere alimentati in maniera continua a mezzo dell'impianto di saldatura.

Gli elettrodi hanno un alto rapporto superficie/volume dato il loro piccolo diametro. Un qualunque prodotto eventualmente utilizzato per favorire la lubrificazione durante la produzione del filo e quindi presente sulla superficie dell'elettrodo, potrebbe influenzare negativamente le proprietà del metallo depositato in saldatura. Questi prodotti possono causare porosità nelle leghe di alluminio e nell' acciaio, e cricche sia nel metallo depositato che nella zona termicamente alterata (Z.T.A.), negli acciai ad elevata resistenza. Per questo, gli

elettrodi sono prodotti con una superficie ad elevata finitura per evitare l'accumularsi di contaminanti sulla loro superficie.

Per migliorare le caratteristiche meccaniche del giunto e l'esteticità del cordone, vengono spesso usati i fili animati prodotti a partire da nastro o tubolari.

Questi fili contengono una cavità interna nella quale viene posto un flusso opportunamente miscelato e triturato, contenente, eventualmente, anche elementi di lega che migliorano le qualità del giunto. I vantaggi legati all'utilizzo di questi fili sono dovuti alla facilità di introdurre elementi all'interno del bagno di fusione, grazie proprio alle presenze del flusso. Questi vantaggi sono però accompagnati da un elevato costo unitario, che supera di gran lunga i fili pieni.

2.4. I GAS DI PROTEZIONE

2.4.1. INTRODUZIONE

Durante il processo di saldatura in atmosfera controllata l'opportuna scelta del gas e quindi della sua composizione influisce sulla riuscita e sulle caratteristiche del cordone di saldatura che si vuole realizzare. Come si è già compreso, la saldatura per dare i migliori risultati deve effettuarsi in modo che l'ossigeno e l'azoto contenuti nell'atmosfera non si combinino con il bagno di fusione. Questa esigenza si è vista soddisfatta con il sistema di saldatura manuale con elettrodi rivestiti e con la saldatura automatica ad arco sommerso.

Orbene, questo stesso scopo viene raggiunto con il sistema di saldatura sotto protezione di gas. Nel caso di processo a filo continuo la gamma di scelta è

molto ampia, in quanto oltre ad i gas inerti tipo Ar (argon) ed He (elio) usati nei processi con elettrodo al tungsteno, si possono usare anche gas riducenti quali l'azoto e le miscele di argon-idrogeno é possibile inoltre in alcuni casi utilizzare anche atmosfere ossidanti.

Ricordiamo che il gas viene definito di protezione in quanto la sua funzione é quella di allontanare l'aria dalla zona di saldatura durante il procedimento stesso. Se non si usasse alcuna protezione, vista la comune tendenza dei metalli, una volta raggiunta la temperatura di fusione, a formare ossidi ed in minore quantità nitruri, si otterrebbero cordoni di saldatura con caratteristiche non accettabili. Inoltre la presenza dell'ossigeno nei pressi della zona fusa potrebbe portare all'ossidazione del carbonio presente nell'acciaio con la formazione di monossido di carbonio ed anidride carbonica CO₂. Bisogna quindi essere sicuri che sia assente aria ed in particolare ossigeno ed azoto dalla zona di saldatura onde evitare che si formino prodotti di reazione che possano

quindi determinare difetti di saldatura, come inclusioni di scorie porosità ed infragilimento del cordone di saldatura.

Il gas più frequentemente impiegato é l'Argon che si estrae dall'aria liquida per distillazione forzata. L'aria contiene circa 1 % di argon che si presenta incolore ed inodore. il suo costo é comunque elevato e questo é uno dei motivi per i quali il suo impiego é limitato alla saldatura delle leghe leggere e degli acciai inossidabili. Negli Stati Uniti é disponibile a costi ragionevoli anche l'elio, altro gas inerte, estraibile dal metano che ne contiene circa il 2%. Gli americani per questo hanno l'alternativa sia dell'elio che delle miscele di argon ed elio.

Oltre questi esistono altri gas inerti quali il neon, lo xeno, il cripto che però hanno costi proibitivi e quindi i vantaggi che ne deriverebbero dal loro uso sarebbero commercialmente improponibili, cosa che vale in Europa anche per l'elio.

E' da ricordare che l'azione protettiva del gas agisce ovviamente solo al diritto del giunto per cui al rovescio la prima passata risulta ossidata e richiede la scricatura con ripresa. In alcuni casi però non si può permettere la ripresa al rovescio; ad esempio ,nel caso dei tubi, ove il rovescio é inaccessibile si dovrà far circolare il gas anche all'interno ricorrendo quindi ad alcuni accorgimenti che pur garantendo la protezione del vertice, riducono al minimo il consumo di gas.

Si tenga presente che la protezione al rovescio non é necessaria per i tubi di acciaio comune.

Ovviamente da quanto sopra esposto si capisce che la scelta del gas dipende da considerazioni tecniche ed economiche. Infatti oltre a svolgere la funzione di protezione del bagno fuso è noto che la composizione del gas, influenza anche alcune delle caratteristiche del processo di saldatura:

- modalità e velocità di fusione del filo
- corrente di transizione
- forma del cordone di saldatura
- gli spruzzi
- la fluidità del bagno
- la tendenza alle incisioni marginali

-la tensione dell' arco

-la dimensione delle gocce di metallo fuso

Nei processi di tipo G.M.A.W. (Gas Metal Arc Welding, saldatura con protezione di gas) si può operare una prima classificazione a secondo della miscela usata che vede i gas divisi in: gas inerti, in questo caso si parla di saldatura di tipo MIG (Metal Inert Gas), gas ossidanti cioè miscele di ossigeno ed anidride carbonica, ed in fine gas riducenti cioè miscele nelle quali é presente pure l'idrogeno, negli ultimi due casi si parla di saldatura di tipo MAG (Metal Active Gas).

Ovviamente a seconda del metallo da saldare e del suo spessore (quindi di tutte le caratteristiche chimico-fisiche) esistono opportune miscele con adeguate concentrazioni di vari gas che, si é visto sperimentalmente, garantiscono la buona riuscita del giunto. La maggior parte di queste sono miscele di gas inerti che contengono piccole quantità di ossigeno o CO₂ . Unica eccezione é, come già anticipato, l'uso dell' azoto nella saldatura del rame.

Riassumiamo per semplicità qui di seguito quali sono le miscele più usate per il tipo di saldatura G.M.A.W. :

- a) Gas inerti puri: Argon ed Elio
- b) Miscele di gas inerti Argon-Elio
- c) Anidride Carbonica (CO₂)
- d) Miscele di tipo binario:

-Argon -Ossigeno

-Argon -Anidride Carbonica

-Argon -Idrogeno

-Argon -Azoto

e) Miscele di tipo ternario:

-Argon -Anidride Carbonica -Ossigeno

-Argon -Elio -Anidride Carbonica

-Argon -Idrogeno -Anidride Carbonica .

2.4.2. SCELTA DELLA MISCELA DI PROTEZIONE

Il “controlled electrical discharge”, conosciuto come arco di saldatura, è formato e sostenuto dallo stabilirsi di un mezzo conduttivo chiamato plasma tra due elettrodi fusibili. Questo plasma è costituito da gas ionizzati, metallo fuso, scorie, vapori, ed atomi e molecole allo stato gassoso. La formazione e la struttura del plasma dipendono dalle proprietà dei gas di protezione che si usano durante la saldatura. Nella tabella I sono elencate le proprietà fondamentali dei gas più usati.

Gas	Simbolo chimico	Peso molecolare	Peso (a)	Densità (g/litro)	Potenziale di ionizzazione (eV)
ARGON	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
AN. CARBONICA	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
ELIO	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
IDROGENO	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
AZOTO	N ₂	28.01	0.967	12.5	14.5
OSSIGENO	O ₂	32.00	1.105	1.43	13.2
(a) Calcolata a 100 kPa e 0°C , il peso viene calcolato rispetto all 'aria					

Tabella I

La scelta della miscela di protezione dipende fundamentalmente dai seguenti fattori:

- Procedimento di saldatura (TIG, MIG, MAG, Plasma)
- Caratteristiche chimico-fisiche del materiale da saldare
- Spessore del materiale
- Materiale d'apporto (se necessario)
- Proprietà meccaniche richieste
- Penetrazione
- Velocità di saldatura

- Qualità richiesta
- Caratteristiche estetiche
- Costi

2.4.3. PROPRIETÀ CHIMICO-FISICHE

Il potenziale di ionizzazione è l'energia, espressa in elettronvolt, necessaria ad allontanare un elettrone dall' atomo del gas trasformandolo in un catione, o un atomo gassoso caricato elettricamente. Mantenendo tutti gli altri fattori costanti, il valore del potenziale di ionizzazione diminuisce con l'aumentare del peso molecolare del gas. L'innesco dell'arco e la sua stabilità sono fortemente influenzati dal potenziale di ionizzazione dei componenti del gas di protezione usato durante il processo di saldatura. Un gas con un basso potenziale di ionizzazione, come ad esempio l' Argon, può facilmente trasformare gli atomi in cationi. L'elio, con il suo relativamente alto potenziale di ionizzazione, produce un difficile innesco e un arco meno stabile.

Sebbene altri fattori sono coinvolti nel mantenimento del plasma, il rispettivo livello di energia richiesto per ionizzare questi gas deve essere mantenuto costante e di conseguenza la differenza di potenziale. tra gli elettrodi ne viene direttamente influenzata. A parità di lunghezza di arco e di differenza di potenziale. tra gli elettrodi, il voltaggio richiesto dall' elio è apprezzabilmente più alto di quello richiesto dall' Argon.

La conducibilità termica di un gas misura quanto facilmente l'arco sia capace di condurre calore ed influenza la perdita di calore radiale (dal centro alla

periferia della colonna dell' arco) così come il trasferimento di calore tra il plasma e il metallo fuso. L' Argon, il quale ha una bassa conducibilità termica produce un arco nel quale si possono evidenziare due zone: una zona centrale molto calda ed una zona periferica con una temperatura considerevolmente più bassa. Il cordone che si ottiene è caratterizzato da un ampio bagno di fusione ed una elevata penetrazione a dito.

Un gas con una più alta conducibilità termica manifesta una piccola differenza di temperatura tra il fuso (zona interna dell' arco) e l'aureola (zona esterna dell' arco).

Questo tipo di distribuzione termica si ottiene usando elio, miscele di argon ed idrogeno e con argon ed anidride carbonica garantendo quindi una migliore distribuzione di calore sulla superficie del cordone e quindi una sezione più regolare.

La dissociazione e riassociazione I gas di protezione, come l' anidride carbonica, l'idrogeno e l'ossigeno si trovano in natura sotto forma molecolare.

Portati ad elevate temperature all'interno dell'arco, questi gas molecolari si dissociano nei loro componenti atomici. Quindi alla fine si ritrovano parzialmente ionizzati, producendo elettroni liberi e molecole ionizzate, quindi corrente. Non appena i gas dissociati entrano in contatto col bagno di fusione, che ha una temperatura più bassa di quella dell' arco, gli atomi dissociati si ricombinano rilasciando calore che riscalda il bagno. Tale particolarità fa sì che il calore ceduto al bagno di fusione sia più uniformemente distribuito sulla superficie di interfaccia rendendo le caratteristiche del cordone simili a quelle ottenute utilizzando elio. La dissociazione e la ricombinazione ovviamente non sono possibili per gas monoatomici come i gas nobili. Quindi, a parità di temperatura

dell'arco, il calore trasmesso alla superficie del bagno risulta considerevolmente più elevato usando dei gas come anidride carbonica ed idrogeno rispetto ai gas inerti.

Reattività e potenziale di ossidazione La natura ossidante del gas di protezione influenza sia le caratteristiche della saldatura che le proprietà delle scorie depositate. L' Argon e l'elio sono completamente non reattivi e questi non hanno un effetto chimico diretto sul metallo fuso. I gas ossidanti come l'anidride carbonica o l'ossigeno reagirebbero con gli elementi del metallo d'apporto o del

metallo base formando un deposito (ossido) sulla superficie del cordone di saldatura. La perdita di elementi, come manganese e silicio, dall' acciaio può alterare la qualità. Sia la durezza che la resistenza del cordone diminuiscono all'aumentare della natura ossidante del gas di protezione.

L'aggiunta di gas reattivi aumentano la stabilità dell' arco e determinano il tipo di trasferimento ottenibile. All'aumentare della percentuale di ossigeno nella miscela si ha una riduzione della tensione superficiale del bagno fuso che determina un incremento della bagnabilità permettendo quindi una velocità di saldatura superiore. Si nota inoltre una progressiva diminuzione delle dimensioni delle gocce di metallo fuso e un aumento del numero di gocce trasferite per unità di tempo. Un'aggiunta di anidride carbonica produce sostanzialmente gli stessi effetti.

La tensione superficiale che si instaura tra metallo fuso e la sovrastante atmosfera influenza notevolmente la geometria del cordone. Se la tensione superficiale è alta il cordone risulterà irregolare e convesso, al contrario bassi valori producono dei letti piatti con una bassissima suscettibilità alle incisioni

marginali.

L'uso di argon puro è di solito associato ad una elevata tensione superficiale e produce un cordone non molto ampio ma alto. Aggiungendo una piccola quantità di gas ossidante, come ad esempio l'ossigeno, la tensione superficiale diminuisce aumentando la fluidità e la bagnabilità del materiale base.

Purezza del gas Alcuni metalli, come ad esempio gli acciai al carbonio e il rame, hanno una relativamente alta tolleranza alla contaminazione dovuta alle impurità contenute nel gas di protezione; altri come ad esempio l'alluminio ed il magnesio sono più sensibili ad alcuni agenti contaminanti. Altri ancora, come il titanio e lo zirconio, hanno una bassa tolleranza per una qualsiasi impurezza della miscela usata.

In funzione del tipo di metallo e del processo di saldatura, una piccola quantità di impurezze può modificare la velocità di saldatura, l'aspetto del giunto, la geometria del cordone e la presenza di soffiature. Gli effetti di una qualsiasi impurità all'interno del bagno hanno ampie ripercussioni ma a noi interessano principalmente quelle che riguardano la qualità e la resistenza del giunto.

La presenza di impurità può essere dovuta o ad una contaminazione di partenza del gas insufflato o ad infiltrazioni esterne nel circuito di distribuzione del gas. Per questo motivo si utilizzano opportune torce di alta qualità e si fa molta attenzione ai raccordi e ai flessibili del circuito. I livelli di purezza minimi dei gas nei processi industriali di saldatura sono elencati nella tabella II.

GAS PRODOTTI	STATO DI PRODUZIONE	PUREZZA	UMIDITÀ'
		MINIMA %	MASSIMA ppm
ARGON	GASSOSO	99.995	10
	LIQUIDO	99.997	6
ANIDRIDE CARBONICA	GASSOSO	99.5	19
	LIQUIDO	99.8	50
ELIO	GASSOSO	99.95	32
	LIQUIDO	99.995	3
IDROGENO	GASSOSO	99.95	8
	LIQUIDO	99.995	5
AZOTO	GASSOSO	99.7	32
	LIQUIDO	99.997	5
OSSIGENO	GASSOSO	99.5	50
	LIQUIDO	99.5	6

Tabella II

La densità è il peso del gas per unità di volume ed è uno dei principali fattori che ne influenzano la scelta. In genere questi sono più pesanti dell'aria, come ad esempio argon ed anidride carbonica, quindi si necessita di una portata minima per saldature in piano e elevata per saldature di diverso tipo.

Al contrario volendo garantire lo stesso tipo di protezione, quando si usa l'elio, più leggero dell'aria, il discorso si inverte.

Per ottenere una protezione adatta ad una specifica applicazione in genere sono necessarie miscele di più gas in modo da trovare un compromesso tra vantaggi e svantaggi di ogni singolo costituente. Alcune miscele di gas hanno delle aree specifiche di applicazione mentre altri possono essere usati con una vasta gamma di materiali e caratteristiche di saldatura. Ogni componente della

miscela contribuisce con le sue proprietà per migliorare le proprietà della stessa.

E' quindi necessario analizzare singolarmente i vari gas e le loro caratteristiche.

2.4.4. ARGON

L' Argon fu scoperto verso la fine del 1800 da William Ramsay (1852-1916), professore di chimica all' "University College" di Londra, che eliminando ossigeno e azoto dall' aria noto una diminuzione di volume del 99%. Esaminando lo spettro del gas residuo si accorse che si trattava di un elemento nuovo con densità più elevata dell'azoto. Tentò di far reagire questo nuovo elemento con diverse sostanze senza alcun successo e per questo lo chiamò argon, dal greco "argo" che letteralmente significa inoperoso. Tale gas è il più abbondante dei gas nobili e per tale ragione ha svariate applicazioni. E' usato per aumentare la durata media delle lampade ad incandescenza e per permettere che

il filamento venga scaldato ad una temperatura più elevate così da ottenere una luce più bianca. E' ampiamente utilizzato nell' industria per realizzare un' atmosfera chimicamente inerte negli impianti di saldatura e per la preparazione dei metalli e delle leghe. Contenuto nell'aria nella misura dello 0.94 % in volume viene prodotto per distillazione dell' aria liquida ottenendo al massimo un grado di purezza del 99,998 % con costi di produzione non eccessivi. Per le sue caratteristiche di gas totalmente inerte viene usato nella saldatura di metalli non ferrosi, acciai inossidabili, al carbonio e basso legati, rame e leghe di

magnesio. Con il suo uso si può garantire l'assenza nel cordone di microporosità dovuta alla non miscibilità del gas con il bagno di fusione. In definitiva si è sicuri, utilizzando questo tipo di protezione, di limitare la presenza di soffiature o tarlature all'interno del cordone di saldatura.

Nonostante la sua difficile reperibilità si è visto che l'Argon è un ottimo gas di protezione poiché ha un basso potenziale di ionizzazione e per questo libera facilmente elettroni rendendo più semplice l'innesco, producendo un arco meno rumoroso e più stabile e diminuendo gli spruzzi durante il processo di saldatura. Comunque il basso potenziale di ionizzazione comporta anche degli svantaggi, quando è usato come unico gas di protezione nelle saldature di lastre di acciaio, riducendo la differenza di potenziale dell'arco, e diminuendone quindi l'energia, diminuisce la penetrazione del giunto con la possibilità di intagli marginali. Combinando le caratteristiche di bassa penetrazione e minori spruzzi l'uso dell'argon puro viene richiesto solo quando per le lamiere di metallo da saldare sono richieste buone caratteristiche estetiche. Quando devono essere saldate lamiere di acciaio pesante l'argon in genere è miscelato con altri gas per produrre una protezione più efficiente la quale migliora il tipo di trasferimento l'aspetto e la penetrazione del giunto. Inoltre per la sua elevata densità, essendo circa 1.33 volte più denso dell'aria (peso atomico 39.95) prende

facilmente il posto dell'aria intorno al cordone, in posizione piana, ed è meno suscettibile a perturbazioni dovute a spostamenti d'aria. In particolare per le saldature in piano viene quasi sempre usata come miscela di protezione argon puro e la portata necessaria per assicurare una conveniente protezione è di circa 15-25 l/min. Per saldare metalli reattivi (con alto potenziale di ossidazione) quali ad esempio l'alluminio, il magnesio, il titanio ed il nichel, l'argon puro è il solo

gas in grado di garantire la necessaria protezione. Al contrario per la saldatura degli acciai ordinari e dei metalli ferrosi è in genere sconsigliato l'uso di argon puro in quanto presenta inconvenienti di tipo economico e tecnico. Essendo il costo di tale gas relativamente elevato, l'incidenza economica è tale da compromettere la competitività del processo sull'acciaio, materiale per il quale esistono altri procedimenti che presentano costi di gestione molto più bassi. Per quanto riguarda la distribuzione del calore all'interno del flusso di protezione la presenza dell'argon puro, gas monoatomico che quindi ad elevate temperature non può dissociarsi, evita la migrazione trasversale del calore concentrandolo nella zona centrale del bagno.

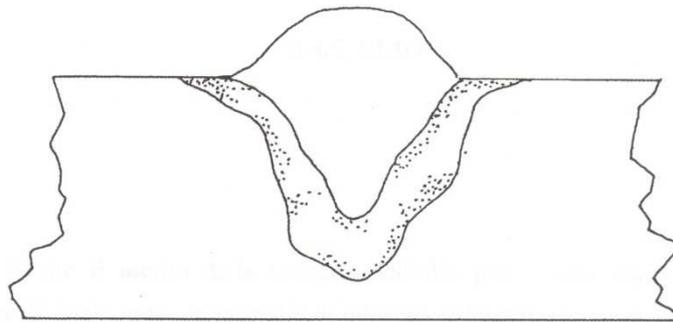


Fig. 2.19 -Schema esplicativo di come è profilo di un cordone ottenuto mediante protezione di solo Argon

Come si vede in *Fig.2.19* l'uso di solo argon permette la formazione di un cordone di saldatura definito tecnicamente "a fungo". Tale cordone è caratterizzato da un' ampia penetrazione centrale e largo alla sommità, talvolta si riscontra la presenza di spruzzi ed incisioni marginali. A volte si aggiunge all' Argon piccole quantità di cloro per evitare o almeno ridurre in parte il fenomeno delle soffiature nella saldature dell' alluminio e delle leghe leggere. Questa alternativa però viene presa poco in considerazione in quanto il cloro sprigiona gas tossici per gli operatori.

2.4.5. ELIO

Anche il merito della scoperta dell' elio può essere attribuita a W. Ramsay, il quale notò, nello studio di minerali radioattivi, lo sprigionarsi di un gas fino ad allora sconosciuto il cui spettro di emissione era stato precedentemente notato nella luce solare. Visto che anche questo nuovo elemento come l' argon non reagiva con alcun elemento chimico arrivò alla conclusione che dovesse esistere un 'intera famiglia di gas inerti e monoatomici come l' argon e l'elio. Continuando con questi esperimenti atti ad evidenziare i gas inerti Ramsay ed il suo assistente Travers riuscirono ad isolare anche altri gas come il cripton, il neon, lo xeno.

L'elio, che si forma dalla disintegrazione dell'uranio e di altri elementi radioattivi, si può trovare intrappolato nei minerali di uranio, dai quali viene messo in libertà per riscaldamento. Una certa quantità di elio formatosi con questo meccanismo é andato lentamente a depositarsi in sacche di gas naturale, che talora possono contenere fino ad un massimo dell' 1 % in volume. Sebbene sia un elemento raro sulla terra esso é l'elemento al secondo posto per

abbondanza nel sole e nel sistema solare. Come l'idrogeno, l'elio é troppo leggero per essere rimasto in quantità apprezzabili nell' atmosfera della terra.

Data la sua leggerezza e la sua inerzia chimica viene utilizzato per riempire i palloni aerostatici e le bombole dei sub insieme all'ossigeno, in quanto l'utilizzo dell' azoto potrebbe essere nocivo, e come gas di protezione nelle saldature.

Anche l'elio si può trovare nell' aria, come l' argon, ma in percentuale notevolmente più bassa approssimativamente dello 0.0004 %, e questo rende non conveniente la sua estrazione per distillazione. Estratto prevalentemente da giacimenti naturali, per esso è possibile raggiungere gradi di purezza del 99.998 %. In Europa, non essendovi apprezzabili giacimenti, la sua estrazione avviene dall' aria mediante un primo processo di liquefazione, una seconda fase di separazione ed un 'ultima fase di purificazione con costi che sono proibitivi per le comuni applicazioni industriali. Al contrario in America esistono grossi giacimenti di metano ricchi di elio e quindi viene utilizzato molto di più che in Europa diventando in molti casi il gas principale di protezione.

Da quando la produzione di argon è diventata meno costosa l'uso di elio è leggermente diminuito anche se per particolari applicazioni resta preferibile, come ad esempio nei processi di tipo G.M.A.W. per la saldatura di elevati spessori, e quando l'aspetto economico è secondario rispetto alle prestazioni richieste al giunto. In particolare viene usato nella saldatura di acciai al carbonio, acciai inossidabili, alluminio ad alta refrattarietà e conducibilità, magnesio e loro leghe, rame e metalli facilmente ossidabili quali titanio, zirconio, nichel e per recipienti industriali. Sebbene si preferisca l'uso dell' argon per un' ampia

gamma di applicazioni a corrente alternata, viene preferito l'elio nel caso di saldature a corrente continua e nelle applicazioni aerospaziali in quanto si è visto da analisi sperimentali che il suo uso evita o almeno riduce la formazione di porosità interne che altrimenti con l'uso del solo argon si otterrebbero.

Essendo totalmente inerte il suo uso garantisce l'assenza nel cordone di saldatura di microporosità dovuta alla miscibilità dei gas col bagno, evitando in questo modo di trovare nel cordone solidificato soffiature o tarlature. Essendo più leggero dell'aria (peso molecolare 4.0083) per ottenere la stessa protezione del bagno di fusione, per saldature in piano, richiederebbe una portata volumetrica da 2 a 3 volte maggiore rispetto a quella di argon, il che l'alto costo comprometterebbe la competitività del processo. A causa della sua alta conducibilità termica la temperatura all'interno dell'arco è più uniforme, il calore trasferito al metallo base è maggiore di quando si usa argon ed avviene in modo più regolare sul bagno fuso, si ottengono quindi più alte velocità di lavoro con un giunto più penetrante, largo e con profilo parabolico vedi *Fig. 2.20*.

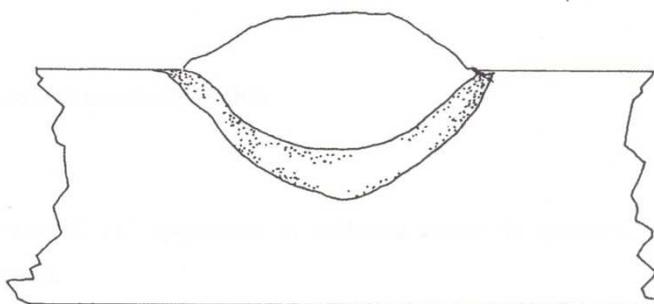


Fig 2.20- Schema esplicativo del profilo di un cordone realizzato con miscela di protezione di solo Elio

Anche il potenziale di ionizzazione è più alto di quello dell'argon e questo crea problemi all'accensione e da origine ad un arco poco stabile. Di fondamentale importanza è inoltre la preparazione dei lembi da saldare che, se non fatta correttamente, può compromettere la buona riuscita del giunto.

A differenza dell'argon che permette di instaurare un trasferimento spray assiale, l'elio al variare della corrente consente di instaurare tutti i tipi di trasferimento tranne quello spray, che è quello che permette una maggior produttività e una migliore rifinitura del cordone. Il problema degli spruzzi e della ruvidità del cordone può essere eliminato aggiungendo argon all'elio. E' inoltre necessario un buon sistema per il controllo della tensione d'arco per controllare la quantità di energia trasmessa al fuso e il tipo di trasferimento. In definitiva le caratteristiche principali nel caso di miscele di protezione totalmente inerti sono:

- 1) Saldatura di eccellente qualità
- 2) Sicurezza di un' operazione di saldatura esente da qualsiasi porosità, e microfratture.
- 3) Saldatura di materiali critici ove occorra uno stretto controllo delle impurità per ottenere saldature sicure come nel caso di metalli reattivi all'ossigeno quali nichel e specialmente titanio e zirconio.

I principali settori di applicazione del processo G.M.A.W. con protezione di gas inerti sono qui di seguito riassunti:

- a) Industria chimica e petrolchimica:

colonne, serbatoi, tubazioni, scambiatori, reattori.

b) Industria elettrochimica.

c) Industria del freddo -criogenia:

strutture metalliche degli scambiatori frigoriferi, colonne di distillazione, serbatoi di stoccaggio.

e) Industria aeronautica ed aerospaziale.

f) Industria meccanica:

materiale inossidabile;

tubisteria saldata;

riparazione di stampi;

valvole automobilistiche;

carrozzeria in alluminio, cisterne, semirimorchi, ribaltanti.

g) Industria nucleare.

2.4.6 MISCELE ARGON –ELIO

Tra i vari tipi di miscele in commercio é possibile trovare mix di argon ed elio che vengono preferiti nel caso di saldatura TIG per alluminio. Se ad esempio si usa un gas composto dal 50 % -80 % di elio (l'aggiunta di una percentuale di quest' ultimo inferiore al 50 % ha poco influenza sulle caratteristiche dell' arco) a parità di lunghezza d'arco c'è bisogno di una tensione superiore a quella che si usa impiegando argon puro. Queste miscele vengono a costare di più del solo argon ma danno ottimi risultati quando si procede a saldare alluminio, magnesio e rame, dato che il maggior calore somministrato riduce gli effetti dovuti alla dispersione termica molto elevata in questi metalli. Si é notato da analisi sperimentali che l'uso dell' elio nel caso di giunzioni sull' alluminio evita la formazione di soffiature interne, cosa che con l'uso del solo argon si sarebbe sicuramente verificata. Le miscele più frequentemente usate sono:

He 75 %. La velocità e la qualità delle saldature di alluminio possono essere migliorate con questa miscela. L'azione pulente é buona come quella che si realizza usando argon puro. La miscela viene usata a volte per saldatura manuale di tubi e per la saldatura automatica di giunti di testa d' alluminio.

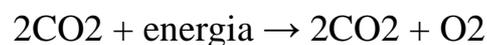
Questa miscela viene anche utilizzata per molte nuove applicazioni TIG in quanto favorisce lo scambio termico con il bagno di fusione e migliora la deposizione del metallo d'apporto.

He 90 %. Questa miscela contiene il 90 % di elio ed il 10 % di argon, e viene talvolta utilizza per la saldatura in contenente continua quando si desidera ottenere caratteristiche di saldatura simili all'elio mantenendo la semplicità di

innesco tipica dell' argon. In qualche applicazione viene utilizzato argon puro solo nella fase di innesco e l'elio durante la saldatura, come ad esempio nelle applicazioni spaziali della N.A.S.A.

2.4.7. ANIDRIDE CARBONICA

E' un gas molto reattivo che viene usato in svariate applicazioni di tipo G.M.A.W. per quanto riguarda gli acciai al carbonio e basso legati. E' l'unico gas reattivo che può essere usato da solo come gas di protezione. Con l'utilizzo di CO₂ si migliorano notevolmente i problemi economici derivanti dall' uso di gas inerti. Infatti il rapporto di costo tra l'argon e l'anidride carbonica é di dieci ad uno, risultando l'uso di quest' ultimo nettamente più economico. I primi esperimenti nei quali si usò anidride carbonica risalgono al 1953. Questo gas tende ad instaurare un trasferimento spray non assiale con notevoli spruzzi. A temperatura ambiente manifesta un comportamento classico di gas inerte in quanto si dimostra stabile e non reattivo nei confronti degli altri elementi. Ad elevate temperature, come quelle che si raggiungono nell' arco, si é notato che é molto reattiva dissociandosi in maniera endotermica, secondo la seguente reazione:



alla quale si può notare lo sprigionarsi di ossigeno molecolare. E' ovvio che in questo caso il saldatore dovrà fare attenzione ad allontanare O₂ dal bagno di

fusione per evitare che le caratteristiche del giunto possano essere deludenti, e questo può essere fatto usando fili disossidanti, come ad esempio un filo del tipo:

$C=0.08\%$; $Mn=1.5\%$; $Si=1\%$; $P<0.03\%$; $S<0.03\%$

L'effetto ossidante dell' anidride carbonica nel caso di saldature su alluminio, magnesio, titanio, nichel, rame e sue leghe non può essere evitato in alcun modo. Per gli acciai inossidabili l'atmosfera di anidride carbonica interverrebbe con effetto carburante e quindi si altererebbe la resistenza alla corrosione del giunto. I vantaggi derivanti dal suo uso non sono solo economici, con tale gas si ottengono velocità di saldatura elevate e migliori penetrazioni, usando solo CO_2 il profilo del cordone tende ad essere molto penetrante e poco largo aumentando però il rischio di formazione di cricche a caldo.

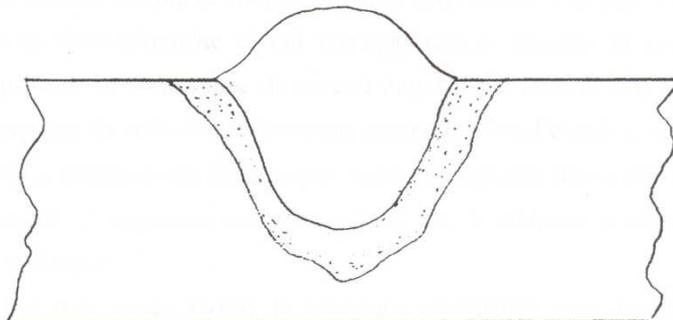


Fig 2.21 -Schema esplicativo del profilo di un cordone realizzato con aggiunta di CO_2 alla miscela di protezione

Per effetto della ricombinazione esotermica delle molecole di monossido di carbonio a contatto con il bagno di fusione viene rilasciata l'energia precedentemente assorbita che riscaldando il giunto da luogo ad una penetrazione più ampia e profonda come si può notare dalla figura. E' inoltre elevato il rapporto di diluizione per cui occorre operare con materiali base di elevata purezza. In definitiva tale gas nonostante generi un cordone grezzo permette velocità di saldatura molto alte con costi contenuti.

A causa della bassa conducibilità elettrica il tipo di arco che si stabilisce è molto instabile e violento, e la tensione di innesco risulta elevata. Il tipo di trasferimento che si può instaurare con questa protezione è principalmente di tipo short-arc e drop-arc a causa dell'elevato valore della corrente di transizione che innesca il regime spray. Se comunque si instaura tale trasferimento il flusso di gocce fuse non è diretto assialmente, ma esse vengono deviate in tutte le direzioni a causa della presenza di campi magnetici e reazioni elettrochimiche di cui tutt'oggi non si conosce la causa ed è accompagnato da formazione di spruzzi lungo il cordone. Il regime spray è accompagnato da variazioni di corrente, osservabili con l'oscilloscopio, perché ogni goccia interposta tra filo e bagno turba la lunghezza libera dell'arco. Con l'inserimento di opportune reattanze nel circuito di saldatura si può eliminare questo problema.

Per tutti questi motivi le saldature effettuabili sono principalmente quelle in piano o d'angolo piano-frontale su spessori medi e grossi (data la sua tendenza alla penetrazione) ed è in genere usata per gli acciai da carpenteria comuni (per motivi concorrenziali di economicità).

L'aggiunta di CO₂ in percentuali del 3-25% a miscele di argon rende l'arco stabile, riduce le incisioni marginali e conferisce alla penetrazione un profilo a pera. In genere l'anidride carbonica viene utilizzata con trasferimento in short-

arc, ma può essere anche adoperata per trasferimenti spray e per l'arco pulsato. Una percentuale di CO₂ superiore al 25% aumenta il valore della corrente di transizione rendendo più difficile e irregolare il funzionamento spray. Certamente la ragione che attira di più gli sperimentatori su questo tipo di miscela è l'economicità di questo gas che permette un notevole abbattimento dei costi.

2.4.8 OSSIGENO

L'ossigeno a temperatura ordinaria presenta le seguenti proprietà fisiche:

Temperatura di fusione = -218°C

Temperatura di ebollizione = -183°C

Temperatura critica = -118°C

Pressione critica = 49.7 At

Densità = 1.43 g/l

Essendo contenuto in grande quantità nell'aria (21 % in volume) e nell'acqua (89 % in peso), da queste l'ossigeno viene ricavato con processi industriali. Dall'acqua l'ossigeno viene estratto per elettrolisi con un grado di purezza 97-99 %, ma il processo risulta costoso e viene impiegato solo per ottenere ad un tempo sia idrogeno che ossigeno. Dall'aria viene invece estratto per distillazione frazionata e rettificazione con due metodi industriali

fondamentali, il metodo Linde ed il metodo Claude. Con questi procedimenti si ottiene ossigeno al 97-99.8 % di purezza, essendo l'impurità costituita essenzialmente da azoto.

L'ossigeno si combina con la maggior parte degli elementi conosciuti tranne che con i gas inerti ed è per questo che viene utilizzato nelle miscele di protezione costituite essenzialmente da elio ed argon. Un'aggiunta di O₂ compresa tra l' 1% - 5% ad una miscela di argon migliora la stabilità dell' arco, migliora la fluidità del bagno di fusione e riduce notevolmente gli spruzzi.

Avendo un basso potenziale di ionizzazione e un' alta conducibilità termica ripartisce meglio il calore nell' arco rendendo la penetrazione più regolare e attenuando la classica forma a fungo caratteristica dell'argon. La presenza di ossigeno nella miscela diminuisce anche la corrente di transizione facilitando l'innesco del regime spray che risulta molto più regolare di quello ottenibile con argon puro. La sua presenza diminuisce inoltre la tendenza alle incisioni i marginali, conseguenza della più uniforme ripartizione del calore, ma tende a far perdere al bagno di fusione elementi di lega come silicio e manganese ossidandoli. Per questo in genere vengono utilizzati fili di apporto con elementi disossidanti come silicio, alluminio, manganese e titanio i quali ossidandosi formano una patina sul bagno evitando che l'ossigeno lo attacchi alterando il metallo base e quello di apporto. La presenza degli ossidi di titanio e di alluminio facilita inoltre il formarsi di germi di cristallizzazione che permettono l'ottenimento di una grana più fine nel cordone con evidente miglioramento delle proprietà meccaniche del giunto. Aumentando la percentuale di ossigeno nella miscela la dimensione media delle gocce trasferite diminuisce aumentandone però il numero nell' unità di tempo. Essendo l'ossigeno meno costoso dell'argon la sua presenza rende più economica la miscela per due motivi: in primo luogo è

ovviamente minore la quantità di argon utilizzata, e in secondo luogo, ricavandosi quest'ultimo dall'aria, ammettendo una certa impurezza di ossigeno nell' Argon ne diminuisce anche il costo di produzione.

In genere si utilizzano miscele contenenti circa il 2% di ossigeno ma questa non è una regola in quanto la quantità ottimale per ottenere i suddetti risultati dipende da fattori esterni e non prevedibili come lo stato superficiale del metallo da saldare, eventuale presenza di ossidi, composizione chimica del metallo da saldare, forma del giunto e posizione di saldatura e caratteristiche dell'arco (tensione e corrente).

2.4.9 IDROGENO

L'idrogeno è l'elemento più abbondante sulla terra e nell'universo, ma nonostante la sua diffusione è stato isolato solo nel 1766 di Cavendish e riconosciuto come elemento a se stante ancora più tardi. E' l'elemento più leggero che si conosca ed è a temperatura ambiente un gas infiammabile. Le sue caratteristiche fisiche a temperatura e pressione atmosferica:

Temperatura di ebollizione = -252.8°C

Temperatura di fusione = -259°C

Densità = 1.43 g/l

L' elettrolisi dall'acqua è forse il metodo più pulito per la produzione di H₂, tuttavia l'energia elettrica è costosa e quindi tale procedura è difficilmente utilizzata. L'acqua può essere scissa in idrogeno ed ossigeno usando calore, ma le notevoli temperature da raggiungere e le grandi quantità di calore in gioco possono essere ottenute solo in impianti nucleari. il metodo più utilizzato è il reforming catalitico degli idrocarburi con vapore nel quale si estrae idrogeno dal metano. Viene aggiunto a gas inerti per aumentare il trasferimento di calore al

bagno di fusione e quando deve operarsi un taglio. Essendo alcuni materiali particolarmente sensibili alla contaminazione da idrogeno il suo uso è limitato ad applicazioni specifiche come la saldatura di acciai basso legati ed il taglio plasma.

2.4.10 AZOTO

Scoperto da Rutherford nel 1772 si ottiene, come l'ossigeno, per liquefazione e distillazione dell'aria liquida essendo il componente principale dell'atmosfera terrestre, della quale costituisce il 78 % in volume. Tale elemento nonostante la sua presenza nell'aria non può essere definito come abbondante sul nostro pianeta. Comunque l'azoto, insieme con il carbonio, ossigeno ed idrogeno, è uno dei costitutivi principali presenti in tutta la materia vivente. E' un gas incolore, inodore ed insapore che si trova allo stato molecolare N₂. Le sue proprietà fisiche a temperatura e pressione atmosferica sono:

Temperatura di ebollizione = -196°C

Temperatura di solidificazione = -210°C

Densità = 1.25 g/l

L'azoto a temperatura ambiente si comporta da gas inerte, dando luogo a pochissime reazioni, al contrario alla temperatura di saldatura reagisce con alcuni metalli come alluminio, magnesio, acciaio e titanio formando nitruri, così che non è mai usato come gas primario di protezione. Con altri gas è invece usato per la saldatura del rame e delle sue leghe e per il taglio plasma.

2.4.11 MISCELE BINARIE

Miscela Argon -Ossigeno

Aggiungendo una piccola quantità di ossigeno all'Argon puro si riesce ad aumentare la quantità di metallo trasferito, a diminuire la corrente di transizione e a migliorare le caratteristiche estetiche del cordone di saldatura. In questo caso il bagno è più fluido e rimane allo stato fuso più a lungo, permettendo una buona distribuzione del metallo fuso all'interno del cordone. La presenza dell'ossigeno favorisce il trasporto di metallo dall'elettrodo al pezzo sotto forma di piccolissime goccioline (trasferimento per proiezione) e aumenta notevolmente la velocità di trasporto.

Le più comuni miscele contengono percentuali di ossigeno che variano dall'1% al 12% in argon, aumentando la quantità di ossigeno si migliora la

stabilità dell' arco aumentando la velocità di saldatura. Si possono comunque trovare miscele in cui la percentuale di O₂ é 0.1 % per applicazioni su metalli non ferrosi ad esempio alluminio. Un aumento oltre il 5 % può però comportare una perdita di elementi di lega aumentando la tendenza agli intagli marginali. Sono impiegate nella saldatura MAG con trasferimento spray di acciai inossidabili, saldatura manuale MIG standard di spessori medi e grossi di acciai al carbonio con bagno molto fluido, rame, nichel e loro leghe, in posizione piana o a cornice. I principali campi di applicazione riguardano calderia inossidabile in genere, costruzione di cisterne e contenitori, accessori di automobili, tubi di scarico, costruzioni di apparecchiature per l'industria chimica e petrolchimica.

Miscela Ar-O₂ (1 %). Le miscele con percentuali di ossigeno dell' 1 % sono usate principalmente per la saldatura spray di acciai inossidabili. Talvolta vengono adoperate anche per la saldatura di acciai basso-legati.

Miscela Ar-O₂ (2 %). Con questo titolo di ossigeno la miscela viene adoperata per la saldatura di acciai al carbonio quando l' ossidazione superficiale e le scorie devono essere minimizzate.

Miscela Ar-O₂ (3 a 5 %). Sono le più usate in quanto realizzano le migliori proprietà del giunto e dell' arco vengono usate per la saldatura di acciai dolci.

Miscela Ar-O₂ (6 al 12 %). Utilizzate solo raramente, per il loro alto potenziale di ossidazione, generano una abbondante scoria superficiale e

richiedono l'utilizzo di speciali fili d'apporto con elementi di lega disciolti per assicurare buone caratteristiche meccaniche alla saldatura.

Miscele Argon -Anidride Carbonica

L'aggiunzione di anidride carbonica all' Argon produce gli stessi effetti che si hanno con l'aggiunta di ossigeno ma inoltre migliora la penetrazione all'aumentare della sua percentuale attenuando la caratteristica sezione a dito del cordone. Con l'uso di queste miscele si riesce ad ottenere un cordone di saldatura di aspetto eccellente, liscio, pulito, lavoro di rifinitura minimo per la bassa quantità di scorie, forte resistenza alla corrosione dato il basso contenuto di carbonio e riduzione delle incisioni marginali. Inoltre si ha un notevole abbattimento dei costi rispetto all' Argon puro (circa il 50 %) in quanto in questo

caso non si necessita un elevato grado di purezza in genere richiesto nella saldatura di tipo MIG. Basti pensare inoltre che nella saldatura di leghe leggere protette da anidride carbonica la portata capace di assicurare una valida protezione del bagno di fusione passa da 15-18 l/min, nel caso di argon puro, a circa 10-15 l/min, nel nostro caso. Le apparecchiature possono essere utilizzate egualmente per i metalli non ferrosi e per le leghe leggere, rendendo l'impianto flessibile, semplicemente sostituendo l' anidride carbonica con l' argon.

Se la quantità di CO₂ supera il 18% - 20 % si rende difficile il mantenimento del regime spray. Con percentuali comprese tra il 20% e il 50 % si può instaurare solo un trasferimento di tipo globulare. Le più comuni miscele

utilizzate per instaurare un trasferimento di tipo spray sono con 5, 8, 10, o dal 13 al 18 % di CO₂ in argon. All'aumentare del contenuto di anidride carbonica il bagno risulta più fluido e quindi permette una maggiore velocità di saldatura. I gas che presentano la composizione tra il 20% e 25 % di CO₂ possono essere usati per trasferimenti di tipo cortocircuitato, garantendo una ottima frequenza di trasferimento e minimi spruzzi quando vengono utilizzati fili continui di diametro tra 0.9 e 1.2 mm (0.035 e 0.045 pollici). E' bene tenere presente che il flusso di CO₂ deve essere di qualità adatta alla saldatura cioè di tipo super secco, in caso contrario si potranno trovare soffiature all'interno del cordone di saldatura. Tali soffiature possono anche essere dovute alla insufficienza della portata di gas dovuta ad esposizione a correnti d'aria e nel caso manuale, al fatto che la torcia è stata inavvertitamente allontanata troppo dal cordone. Questo tipo di miscele sono utilizzate nella saldatura di acciai al carbonio e bassolegati e raramente di acciai inossidabili, in questo caso si utilizza per la saldatura MAG con procedimento ad arco pulsato, mentre per i primi viene utilizzata per saldatura MAG quando si opera su piccoli spessori e si vogliono evitare spruzzi e scorie superficiali.

Queste miscele vengono utilizzate nei seguenti settori: industria meccanica, industria lattiero-casearia, conserviera e della congelazione, industria della carta, industria chimica e petrolchimica (pompe, tubazioni e serbatoi) e costruzione di cisterne.

Miscela Ar -CO₂ (3 al 10 %). Sono utilizzate per saldature di tipo spray degli acciai ed quelle di tipo cortocircuitato, rendendo le saldature meno ossidate rispetto a quelle ottenute con l'ossigeno.

Miscela Ar -CO₂ (20 al 30 %). Queste sono impiegate nella saldatura short-arc di acciai dolci, per alti valori della corrente gli spruzzi diventano eccessivi ed il livello di ossidazione é alto per questo tipo di gas i fili d'apporto devono essere di opportune concentrazioni.

Miscela Argon -Idrogeno

Miscela argon-idrogeno con il 6% di H₂. Questa miscela si é visto molto utile nella saldatura del Ni (Nickel) e delle sue leghe sulle quali l' argon puro tende a lasciare soffiature.

Miscela argon-idrogeno con il 15% di H₂. Questa miscela si presta bene sull' acciaio inossidabile ove accelera l'esecuzione della saldatura aumentando quindi la produttività dell' impianto.

Miscela Argon -Azoto

Piccole quantità di azoto sono addizionate all' Ar-O₂ (1 %) nella saldatura degli acciai per ottenere una microstruttura completamente austenitica.

Concentrazioni tra l' 1.5 ed il 3 % sono normalmente usate, oltre il 10 % vi è produzione eccessiva di fumi ma le saldature hanno buone caratteristiche meccaniche. Aggiunte al di sopra del 2 % generano porosità nelle saldature MIG ad unica passata degli acciai dolci, se la percentuale é inferiore allo 0.5 % si formano porosità nelle saldature MIG a più passate degli acciai al carbonio. In genere piccole percentuali di azoto sono da evitare nella saldatura degli acciai al

carbonio, in quanto potrebbero anche portare alla formazione di nitruri, causa di rottura del giunto per fragilità. Si sono fatti tentativi per l'utilizzo di miscele ricche di azoto nella saldatura del rame e delle sue leghe, notandosi però grosse quantità di spruzzi.

2.4.12. MISCELE DI TIPO TERNARIO

Miscele Argon-Anidride Carbonica -Ossigeno

Le miscele ternarie sono più versatili di quelle binarie coniugando le caratteristiche positive di tre gas elementari, potendo operare con modalità di trasferimento short-arc, globular-arc e spray-arc. E' importante che durante l'uso siano seguite le specifiche del produttore sia per quel che riguarda i campi di applicazione che per le modalità di utilizzo. Questo tipo di atmosfera è particolarmente usata per acciai inossidabili, acciai al carbonio e bassolegati, alluminio, magnesio e loro leghe con spessori non troppo elevati, tale atmosfera sarebbe utilizzabile anche per la saldatura degli acciai comuni da carpenteria solo che si preferisce rivolgersi verso miscele più economiche. L'uso di argon-anidride carbonica-ossigeno permette una minor presenza di spallature, maggior resistenza meccanica del giunto così ottenuto, ottime caratteristiche estetiche, riduzione degli spruzzi, attenuazione della caratteristica forma a fungo del cordone, diminuzione delle incisioni marginali e abbassamento della corrente di transizione con più facile innesco della modalità di trasferimento spray. Per realizzare una eccellente stabilità dell'arco di tipo spray e garantire un buon bagno di fusione anche per saldature fuori posizione con trasferimento di tipo

short-arc e arco pulsato una opportuna miscela ternaria di argon é stata recentemente sviluppata ed introdotta sul mercato statunitense con composizione del tipo:

Ar 80% -CO₂ 15% -O₂ 5%

L'aggiunta di ossigeno molecolare non può superare per alcun motivo la soglia del 5 %, se ciò si verifica si potrebbe avere il problema del decadimento della tenacità o della qualità del giunto. Questo inconveniente insorge quando si ha immissione di ossigeno nel gas di protezione o nel fuso non controllata e desiderata.

Miscela Argon -Elio -Anidride Carbonica

L'elio e l'anidride carbonica aggiunti all'Argon aumentano il calore trasferito al metallo base, la bagnabilità, la fluidità, migliorano il profilo delle gocce e l'estetica del cordone. Associano inoltre il vantaggio della stabilità dell'arco e della penetrazione delle miscele Ar-CO₂ con il calore trasferito dell'elio. Quando la percentuale di elio ed anidride carbonica é inferiore al 40 % si riesce ad instaurare un buon trasferimento spray per acciai al carbonio e basso legati. Si é anche notato un incremento di tolleranza del metallo base alla contaminazione superficiale. Quando il contenuto di elio è tra il 50% e il 60 % il trasferimento può essere o cortocircuitato o globulare. Miscele nelle quali il contenuto di CO₂ è relativamente basso (50%) sono usate in genere per la saldatura di acciai inossidabili senza perdere le caratteristiche di resistenza alla corrosione. Tali

miscele possono essere definite miscele universali in quanto in primo luogo trovano impiego praticamente in tutte le applicazioni manuali e automatiche di saldatura MAG per materiali quali ferro, acciai al carbonio e basso-legati e acciai inossidabili, e in secondo luogo permettono la saldatura in modalità short-arc e spray-arc in tutte le posizioni. I settori nei quali se ne fa vasto uso sono: calderia inossidabile in genere, fusioni inossidabili, officine di riparazione, costruzione di cisterne e contenitori, estintori e serbatoi inossidabili.

Miscele Argon -Idrogeno -Anidride Carbonica

Tali miscele sono utilizzate per la saldatura degli acciai inossidabili austenitici nella modalità short o spray. A causa dell'aggiunta di idrogeno non possono essere usate su acciai al carbonio. L'anidride carbonica e l'idrogeno aumentano il calore trasferito al metallo base incrementandone le caratteristiche così da consentire più elevate velocità di lavoro.

2.4.13. MISCELE DI TIPO QUA TERNARIO

Miscela Argon -Ossigeno -Elio -Anidride Carbonica

Queste miscele, comunemente chiamate miscele "quaternarie", danno la possibilità di ottenere alti tassi di deposito nei processi G.M.A.W., usando alte densità di corrente. Queste miscele danno buone proprietà meccaniche. La loro

maggior applicazione è nelle saldature degli acciai basso legati e ad alta resistenza, ma sono state usate anche sugli acciai dolci per saldatura ad elevata produttività.

L'economicità del procedimento, dovuta alla elevata produttività dello stesso, è di rilevante importanza nella saldatura degli acciai al carbonio e degli acciai legati o basso legati.

Quella più conosciuta industrialmente viene commercializzata dalla STARGON ed ha la seguente composizione:

Argon 66.5 % -Elio 25 % -Ossigeno 0.5 % -Anidride Carbonica 8 % Unico inconveniente che presentano tali miscele è che dopo lunghi periodi di sosta nella bombola la differenza di peso molecolare dei gas fa sì che all'interno del recipiente si stratifichino rendendo la miscela in uscita con composizioni diverse da quelle ipotizzate. Si richiede in questi casi un piccolo accorgimento, cioè agitare il recipiente prima dell'uso.

GMAW: Gas di protezione per il trasferimento Spray

Metalli	Gas di protezione	Spessore	Vantaggi
Alluminio	100% Argon	0-25 mm	Eccellente trasferimento del metallo ed eccellente stabilità d'arco; pochissimi spruzzi.
	35% Argon 65% Elio	25-76 mm	Apporto termico superiore rispetto a quella fornita con Argon puro; caratteristiche di fusione migliori con le leghe di Al-Mg serie 5XXX.
	25% Argon 75% Elio	> di 76 mm	Elevatissimo apporto termico; porosità ridotte al minimo.
Magnesio	100% Argon	-	Eccellente azione pulente.
Acciaio al carbonio	95% Argon 3-5% Ossigeno	-	Buona stabilità d'arco; produzione di un bagno di fusione più fluido e controllabile; buona saldatura e profilo del cordone; incisioni marginali ridotte al minimo; sono permesse più alte velocità di saldatura rispetto a quelle utilizzate con Argon puro.
	90% Argon 8-10% CO ₂	-	Alte velocità di saldatura automatiche; bassi costi della saldatura manuale.
Acciaio basso-legato	98% Argon 2% Ossigeno	-	Incisioni marginali ridotte al minimo; determina buone tenacità.
	99% Argon 1% Ossigeno	-	Buona stabilità d'arco; produzione di un bagno di saldatura più fluido e controllabile; buona saldatura e profilo del cordone; incisioni marginali ridotte al minimo sugli acciai inossidabili di grosso spessore.
Acciaio inossidabile	98% Argon 2% Ossigeno	-	Determina una stabilità d'arco, una saldatura, ed una velocità di saldatura migliore rispetto alla miscela con 1% di O ₂ per acciaio inossidabile di piccolo spessore.
	100% Argon	> di 3.2 mm	Determina una buona bagnabilità; diminuisce la fluidità del metallo di saldatura
Nichel, Rame e loro leghe	Argon Elio	-	Nelle miscele con una percentuale di Elio comprese tra il 50 ed il 75% si hanno apporti termici molto elevati, compensati da una grossa dissipazione di calore negli spessori più grossi.
	100% Argon	-	Buona stabilità d'arco; contaminazione minima del cordone; la protezione di gas inerte è richiesta per prevenire le contaminazioni da aria nella parte posteriore della zona di saldatura.
Titanio	100% Argon	-	Buona stabilità d'arco; contaminazione minima del cordone; la protezione di gas inerte è richiesta per prevenire le contaminazioni da aria nella parte posteriore della zona di saldatura.

Tabella III

GMAW: Gas di protezione per il trasferimento cortocircuitato

Metallo	Gas di protezione	Spessore	Vantaggi
Acciaio al carbonio	75% Argon 25% CO ₂	< di 3.2 mm	Alte velocità di saldatura senza sfondamento; minime distorsioni e spruzzi.
	75% Argon 25% CO ₂	> di 3.2 mm	Pochissimi spruzzi; buona pulizia della saldatura; buon controllo del bagno di fusione nelle posizioni verticale e sopratesta.
	Argon con 5-10% CO ₂	-	Penetrazione molto profonda; velocità di saldatura più veloci.
	90% Elio 7.5% Argon 2.5% CO ₂	-	Nessun effetto sulla resistenza alla corrosione; piccola estensione della zona termicamente alterata; non ci sono incisioni marginali; le distorsioni sono molto basse.
Acciaio inossidabile	60-70% Elio 25-35% Argon 4-5% CO ₂	-	Reattività minima; eccellente tenacità; stabilità d'arco, caratteristiche bagnanti, e profilo del cordone eccellenti; pochi spruzzi.
	75% Argon 25% CO ₂	-	Giusta tenacità; stabilità d'arco, caratteristiche bagnanti, e profilo del cordone eccellenti; pochi spruzzi.
	Argon	> di 3.2 mm	L'argon è soddisfacente sulle lamiere sottili; l'argon-elio è preferito dal materiale base.
	Argon o Elio		

Tabella IV

2.5. DIFETTI DI SALDATURA

2.5.1 INFRAGILIMENTO DA IDROGENO

Tale tipo di difetto costituisce uno dei più importanti, sebbene non si presenti spesso nella saldatura G.M.A.W. data l'assenza di flusso o rivestimento igroscopico. In ogni caso bisogna considerare altre possibili fonti di idrogeno. Per esempio il gas di protezione deve avere un contenuto di umidità minimo. Questo dovrebbe essere verificato dal fornitore di gas o, in alcuni casi, controllato dall'utilizzatore. L'olio, il grasso o i prodotti utilizzati per disegnare, eventualmente presenti sulla superficie del filo o del metallo base, possono costituire possibili fonti di idrogeno, per cui, prima di effettuare la saldatura, è utile pulire il metallo base ed eventualmente il filo. I fili pieni utilizzati devono essere esenti da qualsiasi prodotto depositato sulla superficie. L'utilizzatore deve manipolare tali fili in modo da non inquinare la superficie degli stessi. Tali precauzioni devono essere prese quanto più re attivi sono i metalli da saldare (alluminio, magnesio, nichel, ecc.) e quanto maggiori sono le caratteristiche meccaniche desiderate del metallo depositato e del giunto. Nella saldatura dell'alluminio il problema che si può verificare è costituito da porosità da idrogeno proveniente da umidità od altro inquinante, piuttosto che infragilimento da idrogeno.

2.5.2 CONTAMINAZIONE DA OSSIGENO O AZOTO.

L'ossigeno e l'azoto costituiscono problemi potenziali maggiori dell'idrogeno nei processi GMAW. Se il gas di protezione non è completamente inerte o sufficientemente protettivo, questi gas possono essere assorbiti dall'atmosfera. Sia gli ossidi che i nitruri degli elementi che costituiscono il metallo base da saldare, possono diminuire la capacità di resistenza all'intaglio o la resilienza.

Il metallo depositato tramite procedimento G.M.A.W. non è così tenace come quello depositato tramite procedimento TIG.

Bisogna notare, comunque, che l'aggiunta di O₂ al gas di protezione fino ad una percentuale pari al 5%, non genera nessun problema di decadimento della tenacità o della qualità del giunto.

Tali problemi, insorgono, quindi, quando si ha una immissione di ossigeno nel gas di protezione o nel metallo depositato, non controllata e non desiderata.

2.5.3. PULIZIA

La pulizia del metallo base da saldare è molto più critica per i procedimenti G.M.A.W. rispetto ai procedimenti ad elettrodo rivestito o in arco sommerso. I prodotti presenti nel rivestimento degli elettrodi o nei flussi, disossidano e puliscono il deposito di metallo fuso da ossidi e composti produttori di gas. Le scorie non sono presenti nel procedimento G.M.A.W.

Questo implica che la pulizia pre-saldatura o interpass del giunto da saldare, ha un ruolo di enorme importanza nella saldatura G.M.A.W.

Questo e' particolarmente vero per la saldatura dell' alluminio dove si adottano procedimenti di pulitura e disossidazione molto complessi.

2.5.4 FUSIONE INCOMPLETA

Un ridotto apporto termico, nella saldatura short-arc, determina una penetrazione del cordone ridotta nel metallo base. Tale caratteristica e' desiderata nella saldatura di lamiere sottili o nella saldatura in posizione non piana o orizzontale. Comunque, una tecnica di saldatura non corretta può generare una fusione non completa del metallo base specialmente nel fondo cianfrino e sulle superfici laterali del cianfrino.

3.0 AUTOMAZIONE DEL PROCESSO

Nel campo della saldatura, le varie metodologie diagnostiche e di monitoraggio assumono oggi un'importanza fondamentale sia per prevenire anomalie durante i processi industriali di tipo avanzato, sia per assicurare l'integrità strutturale di componenti particolarmente critici. Al riguardo, l'attuale disponibilità di sofisticati sistemi elettronici ed informatici ha recentemente introdotto nuove metodologie per garantire la conformità del prodotto: in particolare, esse si basano sulla prevenzione attraverso strumenti operativi che consentono di monitorare ed intervenire tempestivamente sul processo, evitando di dover gestire le conseguenze della produzione di componenti non conformi.

In particolare, tra i sistemi di controllo della qualità finalizzati ad assicurare l'affidabilità e la sicurezza di componenti anche complessi, le metodologie diagnostiche e di monitoraggio dei processi operativi particolarmente critici hanno assunto, negli ultimi decenni, una funzione strategica non solo per la prevenzione delle anomalie e dei malfunzionamenti in esercizio, ma anche in tutto quel complesso di prove e verifiche necessarie alla qualificazione e/o certificazione di componenti ed impianti da parte degli Enti preposti allo scopo.

Per quanto concerne specificatamente il campo della saldatura, l'applicazione dei criteri di "garanzia della qualità" è diventata parte integrante di tutte quelle attività industriali che influiscono in maniera determinante sulla sicurezza preventiva e sulla qualità del prodotto finale.

In tale contesto, tenendo fede al principio che la "qualità di un prodotto e/o processo" si realizza attraverso la "qualità del sistema che lo produce", i processi di saldatura risultano di natura così specialistica che è indispensabile

prevedere, oltre alla qualificazione del personale, prescrizioni particolareggiate al fine di assicurare la messa a punto dettagliata di una sequenza sistematica ed immutabile nel tempo.

Una pronta stima di un errore di processo nella linea di produzione può prevenire il rallentamento della produzione e intensivi costi di post processo.

È necessario quindi applicare un sistema adattativo che controlli i parametri di saldatura ed effettui variazioni degli stessi, durante il processo (online), per produrre saldature efficienti.

I principali sistemi di adattamento sono di tipo:

- Ottico
- Robotizzato
- Tramite approccio numerico
- Tramite reti neurali

Lo stato dell'arte in materia è al giorno d'oggi limitato a qualche applicazione sperimentale di monitoraggio ottico , di controllo tramite reti neurali e pochissime applicazioni industriali di controllo robotizzato.

Il controllo adattivo industriale è ancora proibitivo dal punto di vista economico e sicuramente poco versatile.

Questo progetto di ricerca è stato quindi indirizzato allo sviluppo di un sistema completamente automatizzato, controllato da un' intelligenza artificiale basata su modelli ibridi fuzzy logic e booleani.

Per fare ciò si intende procedere innanzitutto a ricercare i parametri ottimali di saldatura per ogni applicazione , utilizzare ,poi, tali configurazioni per l'addestramento di una rete neurale che esegua un controllo adattivo (on line) della saldatura attraverso sistemi di visione CCD e tastatori meccanici che diano in tempo reale lo stato termico/deformativo del provino e permettano la correzione dei parametri e delle traiettorie della torcia.

Volendo ora soffermarsi sugli aspetti scientifici del progetto , v'è precisato che un sistema completo, basato cioè sull'interazione di tutti i sistemi di controllo esistenti, non è stato ancora proposto sul mercato industriale e pertanto il successo derivante dal perseguire questa strada porterà ad una notevole diminuzione dei costi di produzione delle carpenterie saldate ed un notevole incremento della produttività.

Si pensi, infatti, alle grosse prefabbricazioni navali ed off-shore dove il grosso del tempo viene speso in operazioni di saldatura.

Realizzare un impianto a basso costo e ad alta qualità permetterà l'accesso alla tecnologia da parte di imprese medio-piccole nelle quali il processo è ancora di tipo manuale e da parte dei paesi in via di sviluppo dove sono proibitivi costi d'impianto come quelli della saldatura ad arco sommerso.

Per automatizzare il processo GMAW bisogna costruire un sistema in grado di rilevare la traiettoria di saldatura e la dimensione del meato di saldatura, di analizzarla e stabilire i parametri di saldatura ottimi per quella condizione in modo da garantire la stabilità del processo e la qualità del risultato.

La necessità di realizzare ciò risiede nel fatto che nel corso dei processi di saldatura in genere, e a maggiore ragione nel caso della saldatura GMA, si verificano importanti variazioni delle condizioni operative dovute sia a fattori esterni (atmosfera, inclusioni, tensione superficiale, ecc.) che alla stessa azione termica della saldatura sul metallo base (distorsioni, trasformazioni strutturali, ecc.). Riuscire a tener conto delle variazioni suddette nel corso del processo stesso e adeguare i parametri di controllo, in modo da garantire in ciascuna condizione la formazione di un cordone con la geometria più adeguata allo stato attuale, rappresenterebbe la soluzione definitiva al problema proposto.

In questo senso una possibile soluzione può essere trovata nella progettazione di un sistema di saldatura integrato del tipo illustrato in figura 3 costituito, oltre che dal sistema GMAW e da un sistema di movimentazione a tre assi, anche da un sistema di acquisizione visiva e da un sistema di acquisizione e controllo interfacciati ad un PC centrale, che si occupa della elaborazione dei dati e della definizione delle opportune condizioni di saldatura. Il funzionamento del sistema integrato prevede l'acquisizione da parte del sensore visivo di immagini del bagno o del cordone di saldatura ad un certo istante t ; attraverso un opportuno processore l'immagine può essere elaborata in modo da individuare i limiti fisici del cordone e la configurazione del metallo base. Quest'ultima viene fornita in input ad un sistema basato su logica neuro - fuzzy, progettato in modo da fornire la geometria ottima del cordone per quella configurazione del metallo base.

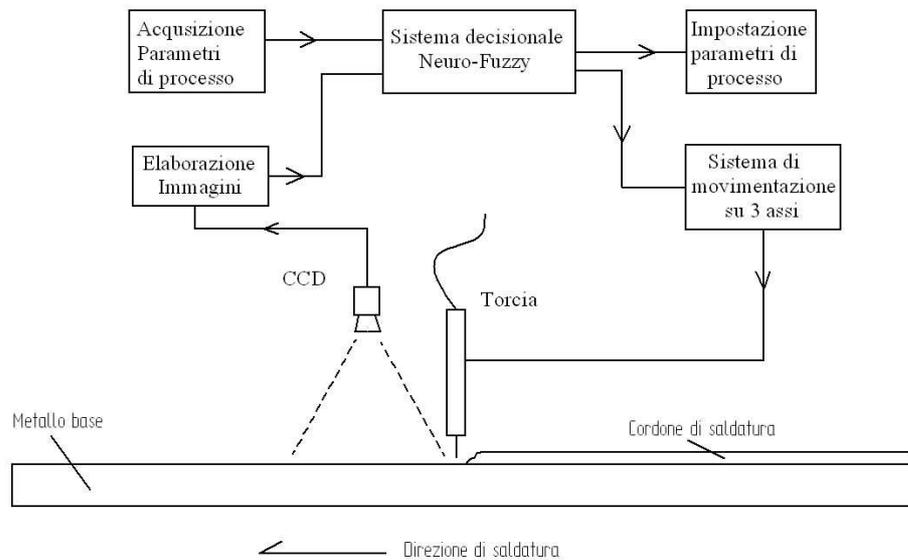


Figura 2 – Sistema di saldatura integrato per l’ottimizzazione del cordone di saldatura

3.1 - Premessa

Lo scopo di questo capitolo è quello di descrivere l’*impianto sperimentale* presente nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell’Università di Napoli Federico II, ed oggetto di questo studio, composto dai seguenti elementi:

- l’impianto di saldatura
- il sistema di visione

In questo modo sarà possibile avere un quadro completo sullo stato attuale dell’impianto e sulle modifiche ad esso apportate in seguito a questo lavoro.

3.2 – L'impianto di saldatura

L'impianto di saldatura preso in considerazione, come già detto, è quello già presente nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione dell'Università di Napoli Federico II dotato di un sistema di acquisizione e controllo gestito via software in grado di monitorare e modificare in tempo reale i principali parametri di saldatura. Tali parametri sono:

- Corrente di saldatura
- Tensione di saldatura
- Velocità di avanzamento della torcia
- Velocità di alimentazione del filo
- Portata di gas di protezione
- Posizione della torcia di saldatura
-

Oltre a gestire i suddetti parametri, il sistema è in grado di controllare completamente, con una precisione dell'ordine del decimo di millimetro, la posizione istantanea della torcia di saldatura.

Il sistema di posizionamento e movimentazione della torcia di saldatura ha la possibilità di uno spostamento, sia automatico che manuale, non solo lungo l'asse longitudinale di saldatura, ma anche lungo un asse verticale ed uno orizzontale perpendicolare all'asse longitudinale di saldatura. Il movimento verticale consente di controllare la distanza tra la torcia ed il bagno fuso e quindi concorre anche alla lunghezza di stick-out, quello orizzontale è indispensabile se si vuole garantire un costante allineamento tra l'asse della torcia e quello del gap tra i due lembi da saldare.

L'intero impianto di saldatura risulta quindi costituito dai seguenti elementi:

- Un generatore di corrente ad inverter Miller da 565 A
- Un gruppo di trascinamento del filo Miller modello S-64M
- Una torcia a 180° con sistema di raffreddamento Miller ad acqua
- Un sistema di avanzamento della torcia prodotto dalla FRO
- Un ulteriore sistema motorizzato di movimentazione della torcia
- Un banco di saldatura
- Un sensore di tensione
- Un sensore di corrente
- Un sensore di velocità del filo
- Un sensore di velocità della torcia lungo l'asse longitudinale
- Un miscelatore di gas con misura di portata
- Una centralina di acquisizione della Computer Weld Technology
- Una scheda di acquisizione dati National Instrument modello NI 6229
- Una centralina elettronica di controllo gestita dal pc
- Un pc con sistema operativo Windows xp e software National Instruments Labview versione 8.0

Nella Figura 3.1, per maggiore chiarezza, è riportata una vista d'insieme dell'impianto oggetto del lavoro.

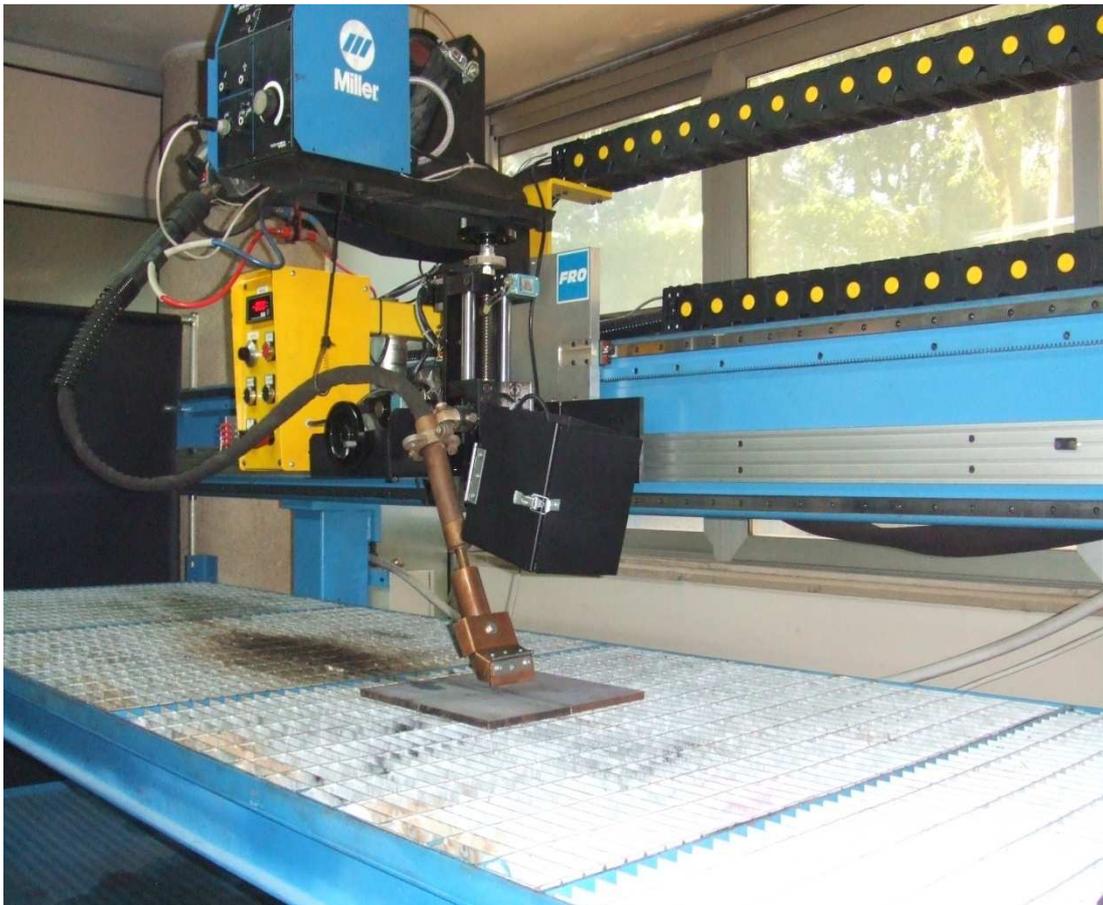


Figura 3.1 – Vista d’insieme dell’impianto

A questi componenti già presenti prima di questo intervento sono stati aggiunti tutti quelli relativi al sistema di visione che sono stati appositamente realizzati o acquistati per lo sviluppo del sistema di controllo e di visione.

3.2.1 – Il generatore di corrente ad inverter Miller da 565 A

Il generatore di corrente è del tipo ad inverter, modello Phoenix 456 CC/CV prodotto da Miller e riportato nella Figura 3.2.

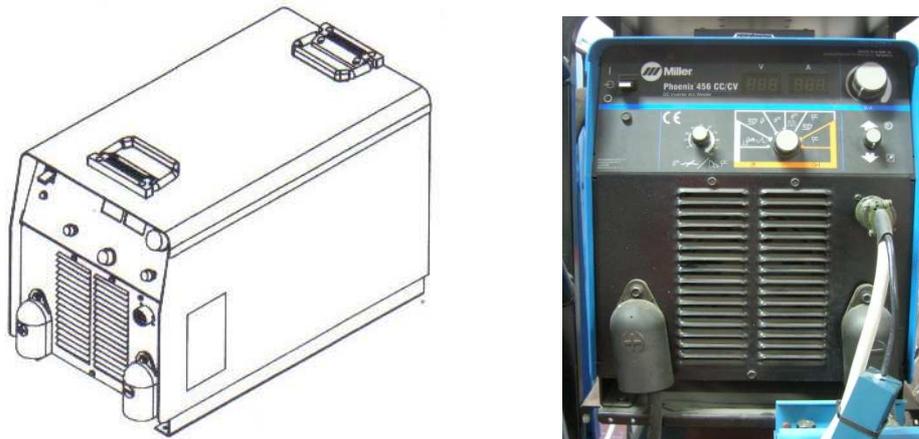


Figura 3.2 – Generatore di corrente *Miller Phoenix 456CC/CV*

Tipo di alimentazione	Prestazioni	Gamma regolazione corrente	Gamma regolazione tensione	Tensione a vuoto massima	Corrente assorbita dalla linea di alimentazione al carico nominale, 50/60 Hz, trifase		
					400 V	KVA	KW
Trifase	450 A con 38 V C.C. Ciclo di lavoro del 100%; 565 A con 38 V C.C. Ciclo di lavoro del 60%	5 - 600	10 - 38	95	31	21,6	19,4

Tabella 3.1 – Campo di funzionamento del generatore

Come si può vedere dalla Tabella 2.1, esso consente ampi margini di regolazione ed è capace di operare sia a corrente costante che a tensione costante secondo le due caratteristiche interne di Figura 3.3.

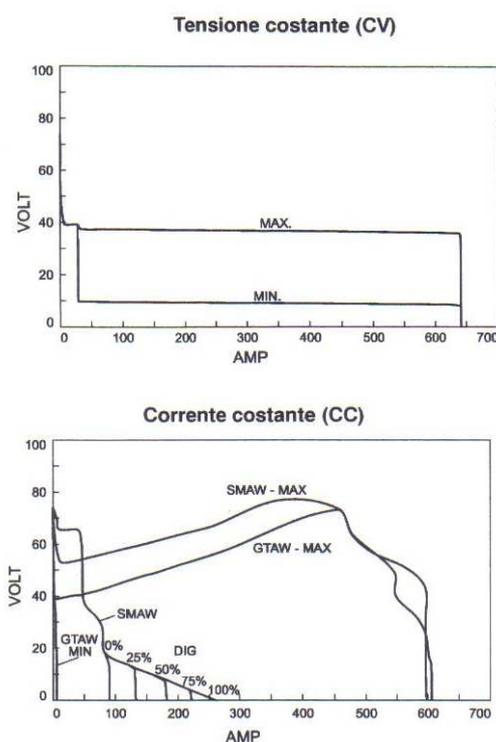
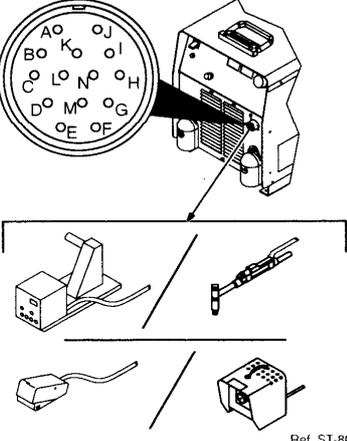


Figura 3.3 – Caratteristiche interne del generatore

Questo modello, pensato per integrarsi perfettamente in un sistema di saldatura articolato in più componenti, prevede la possibilità di impostare tutti i parametri di funzionamento, oltre che dal pannello frontale, anche da un'unità remota compatibile, attraverso una presa a 14 pin indicata col nome *REMOTE 14*.

Nella seguente Figura 3.4 è indicata la funzione di ogni singolo pin; in particolare, quello *E* è stato sfruttato per impostare, a mezzo di un segnale analogico (0-10V C.C.), la tensione di saldatura direttamente via software dal sistema di controllo.

A tale scopo è stato inserito nel circuito, in prossimità del connettore, un commutatore che permette di stabilire se il controllo della tensione d'arco debba essere effettuato dal computer integrato nel gruppo di trascinamento del filo oppure dal sistema di controllo che si è sviluppato.

 <p>Ref. ST-801 718</p>	 REMOTE 14	Termi- nali Presa*	Informazioni
	 24 V CA OUTPUT (CONTACTOR)	A	24 V C.A. Protetto dal disgiuntore (CB2).
		B	La chiusura con il contatto A completa il circuito di comando del contattore a 24 V.
	 115 V CA OUTPUT (CONTACTOR)	I	115 V C.A. Protetto dal disgiuntore (CB1).
		J	La chiusura con il contatto "I" completa il circuito di comando del contattore a 115 V C.A.
	REGOLAZIONE A DISTANZA	C	Erogazione verso il comando a distanza; +10 V C.C. in modalità MIG.
		D	Circuito comune, comando a distanza.
		E	Segnale di ingresso da 0 a + 10 V C.C. dal comando a distanza
		M	Selezione modalità.
	A/V CORRENTE TENSIONE	N	Regolazione induttanza a distanza.
		F	Segnale corrente; +1 V C.C. ogni 100 A.
		H	Segnale tensione; +1 V C.C. ogni 10 V dell'arco.
GND	G	Comune dei circuiti a 24 e 115 volt, C.A.	
	K	Comune alla carcassa.	

*Gli altri terminali non sono utilizzati.

Figura 3.4 – Pin out della presa *REMOTE 14*

3.2.2 – Il gruppo di trascinamento del filo Miller modello S-64M

Il sistema di alimentazione del filo presente nell'impianto è prodotto, come il generatore, da MILLER: si tratta precisamente del modello S-64M, ed è mostrato nella Figura 3.5.

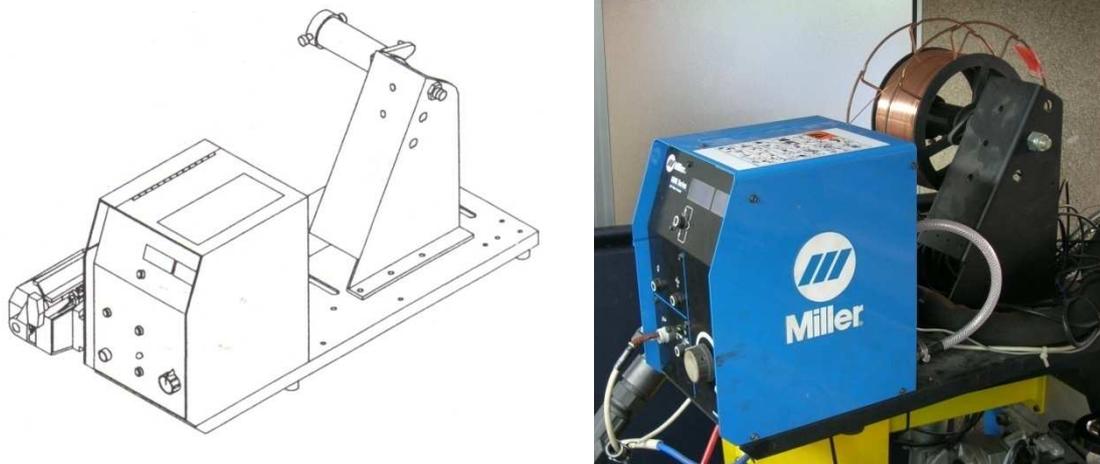


Figura 3.5 – Sistema di alimentazione del filo *Miller 64M*

Questo è dotato di un computer integrato dal quale è possibile impostare praticamente tutti i parametri di saldatura ad eccezione della velocità di avanzamento della torcia (*travel*). A mezzo della già citata presa *REMOTE 14* è possibile una comunicazione costante tra questa unità ed il generatore di corrente. Oltre alla possibilità di regolare i parametri singolarmente è presente, già preinstallata, una completa libreria di programmi di saldatura per varie tipologie di giunto da realizzare nonché la possibilità di importare programmi completi dall'esterno mediante schede di memoria.

Il dispositivo di trascinamento vero e proprio è realizzato a mezzo di quattro rulli di metallo, mostrato in Figura 3.6, che, serrati sul filo con un precarico affidato ad un sistema di molle regolabile, lo trascinano grazie all'azionamento di un motore elettrico.

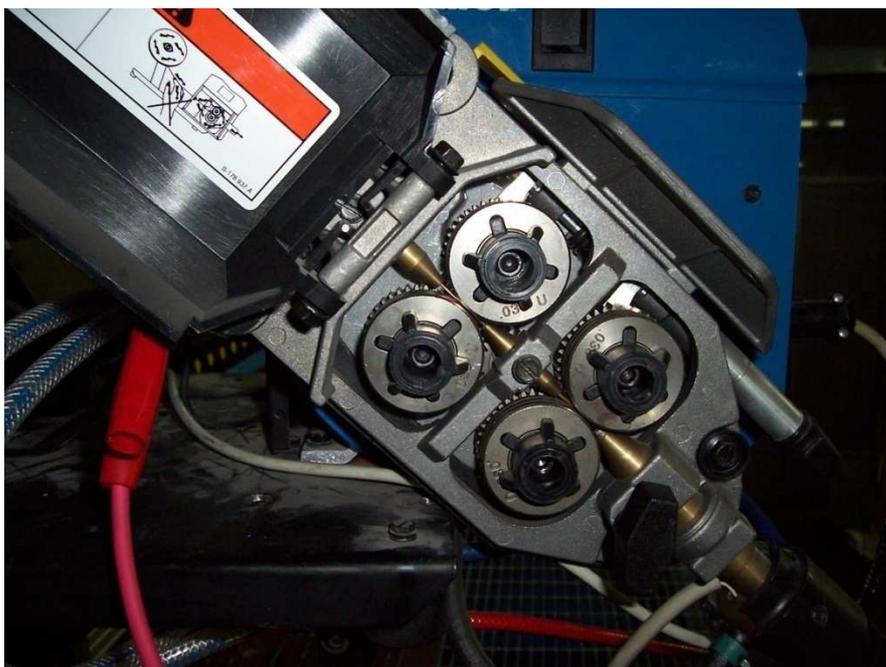


Figura 3.6 – Il sistema di trascinamento a quattro rulli

C'è da far presente che, mentre da un lato questo sistema si dimostra particolarmente affidabile, rendendo nulla la possibilità di inceppamenti o di strisciamenti relativi tra rulli e filo e quindi garantendo una velocità di alimentazione dell'elettrodo costante, dall'altro, rende non proprio immediata l'operazione di sostituzione del filo.

La velocità effettiva di avanzamento dell'elettrodo, essendo un parametro fondamentale nel processo GMAW, è necessario che venga misurata dal sistema di acquisizione che si intende sviluppare. In commercio esistono vari sensori appositamente studiati per questo scopo, il loro prezzo si aggira intorno agli ottocento euro ed il principio di funzionamento su cui si basano è sostanzialmente lo stesso per tutti. L'elemento di cui si intende misurare la velocità, nel caso specifico il filo, nell'avanzare, mette in rotazione l'asse di un dispositivo elettromeccanico detto *encoder incrementale*. Questo, nella sua forma più

elementare, è costituito da un disco forato, da una sorgente luminosa e da un elemento fotosensibile come illustrato nella Figura 3.7.

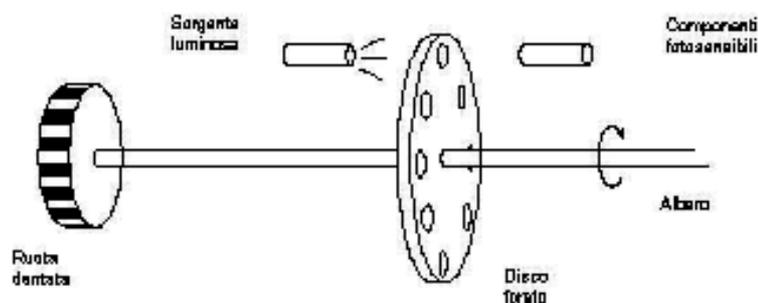


Figura 3.7 – Schema semplificato di un encoder ottico

Il disco, ruotando, blocca o lascia passare, alternativamente, la luce generata dalla sorgente luminosa che raggiunge così l'elemento fotosensibile in modo intermittente. La frequenza del segnale generato, è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione dell'encoder e quindi a quella di trascinamento del filo. Nel dispositivo di alimentazione della MILLER, è già presente un encoder che misura la velocità di trascinamento del filo, il segnale però, non viene inviato all'esterno ma utilizzato, unicamente, per funzioni interne di feed-back. Si è deciso di intercettarlo ed inviarlo al sistema di acquisizione giungendo così ad una soluzione ugualmente valida e precisa e dal costo realmente contenuto.

3.2.3 – La torcia a 180° con sistema di raffreddamento Miller ad acqua

La torcia di saldatura utilizzata è specifica per impianti automatici ed è raffreddata ad acqua. Come si può notare dalla Figura 3.8, il boccaglio è in asse con l'impugnatura ed è assente il pulsante di azionamento, sempre presente negli

impianti manuali. Il comando di azionamento viene fornito dall'unità di controllo del carro motorizzato sul quale è montata la torcia stessa nel momento in cui inizia il movimento di traslazione longitudinale.



Figura 3.8 – La torcia di saldatura

Il cavo flessibile contenente i tubi di acqua, gas di protezione, condotto di alimentazione del filo e cavi elettrici, è abbastanza lungo e flessibile da permettere movimenti della torcia veramente ampi.

Infatti, durante le varie prove effettuate, anche quando questo mostrava raggi di curvatura minimi, non si sono avuti problemi di alcun tipo, specialmente al

sistema di guida del filo che ha dimostrato l'ottima qualità di tutti i componenti. All'interno della torcia è anche presente una termocoppia in grado di leggerne la temperatura, al momento, però, essendo questa un parametro di secondaria importanza non è stato acquisito.

Di produzione MILLER anche il sistema di raffreddamento mostrato in Figura 3.10 per la circolazione ed il raffreddamento dell'acqua refrigerante.



Figura 3.10 – Il sistema di raffreddamento Miller

3.2.4 – Il sistema di avanzamento della torcia della FRO

Il sistema di avanzamento della torcia nel piano longitudinale della macchina saldatrice, è prodotto dalla *FRO* ed è costituito fondamentalmente da una traversa orizzontale sulla quale scorre un carro motorizzato. Questo è azionato da un

motore a corrente continua che garantisce un avanzamento della torcia costante ed esente da vibrazioni.

Il carrello, inoltre, è così robusto da poter portare non solo la torcia e l'ulteriore sistema di movimentazione di cui si parlerà in seguito, ma anche l'intero gruppo di alimentazione del filo.

Tutti i comandi sono azionabili da un pannello frontale solidale al carro mostrato chiaramente nella Figura 3.11.



Figura 3.11 – Vista del pannello frontale

Dovendo, però, poter comandare il carro, oltre che dal pannello frontale, anche dai comandi ausiliari e via software, circostanza, questa, non prevista dal costruttore, è stato necessario apportare sostanziali modifiche all'elettronica del sistema. Quasi tutta la suddetta parte elettronica del sistema in esame si trova

all'interno di un quadro metallico posto sul retro dell'impianto. I cablaggi elettrici tra il quadro posteriore ed il pannello frontale passano attraverso una catena passacavo in materiali plastico posta sopra la traversa. Nell'ottica di interfacciare l'elettronica del carro con quella del sistema di controllo, si è installato un cavo multipolare tra le due unità. Questo, in previsione anche di interventi futuri, è stato dimensionato per correnti fino a 7 ampere per polo per un totale di 24 poli. Ogni singolo comando presente sul pannello frontale del carrello motorizzato è stato opportunamente intercettato in modo da poter essere azionato, tramite il cavo multipolare di cui si è accennato, dal sistema di controllo che si è realizzato. Tutti i comandi sono contemporaneamente azionabili sia dal pannello frontale che dal PC ad eccezione della regolazione della velocità di avanzamento del carrello che, tramite un commutatore, può essere effettuata alternativamente dall'una o dall'altra unità.

3.2.5 – L'ulteriore sistema motorizzato di movimentazione della torcia

Il carro motorizzato permette di muovere la torcia di saldatura soltanto lungo l'asse longitudinale; tuttavia è indispensabile poterla spostare anche in un piano perpendicolare all'asse di saldatura, e in altezza (regolazione dello *stick-out*), in modo da poter adattare il sistema alle variazioni delle dimensioni delle piastre da saldare.

Volendo inoltre controllare in tempo reale sia la posizione della torcia in direzione verticale che in quella trasversale con una precisione del decimo di millimetro si è deciso di sviluppare un sistema di posizionamento automatico che rispondesse in pieno alle necessità operative. Un'immagine del sistema di movimentazione della torcia è riportata nella Figura 3.12.



Figura 3.12 – Il sistema di movimentazione della torcia

Per la realizzazione del sistema di movimentazione si è deciso di bloccare la torcia su un sistema composto da due slitte scorrevoli mutuamente ortogonali alle quali sono stati poi accoppiati due motori passo-passo per l'azionamento automatico (di cui si parlerà di seguito). Le due slitte, orizzontale e verticale, hanno una corsa utile rispettivamente di 200 mm e 100 mm; in entrambe, la parte mobile che scorre su robuste guide cilindriche interamente cromate, ingrana con una madrevite avente un passo pari a 5 mm. Sia per la slitta verticale che quella orizzontale, ad un giro completo della madrevite corrisponde un avanzamento della torcia di 5 mm.

I motori utilizzati per la movimentazione delle slitte, sono dei motori passo-passo di tipo bipolare aventi una risoluzione angolare di 1.8 gradi/passi con una corrente nominale massima per ciascuna fase di 2 A e sono comandati, ognuno,

dalla scheda driver ad esso dedicata presente nella centralina di controllo. Ognuno dei motori è accoppiato meccanicamente alla madrevite della slitta per mezzo di un sistema di trasmissione a cinghia dentata, sistema scelto per scongiurare il pericolo di possibili slittamenti che porterebbero a errori di posizionamento anche considerevoli. Un particolare della trasmissione a cinghia dentata è riportato nella Figura 3.13.

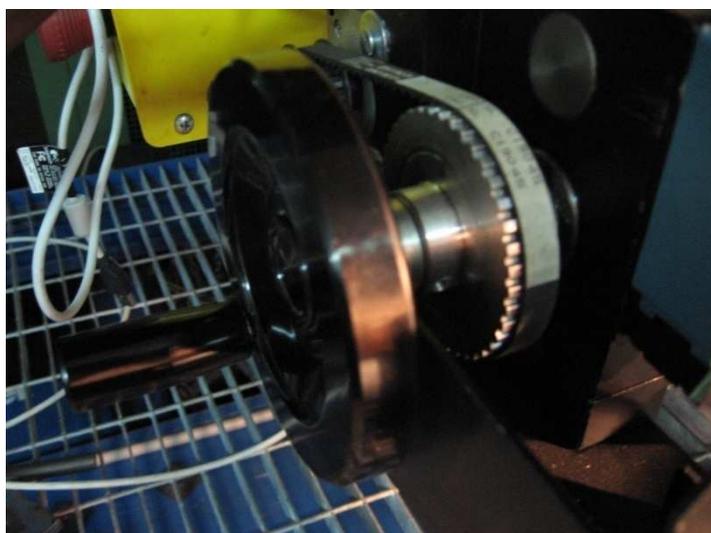


Figura 3.13 – Particolare della trasmissione a cinghia dentata

Le pulegge scelte, sul motore e sulla madrevite, hanno rispettivamente 20 e 40 denti; ne consegue un rapporto di riduzione di 2:1. Questo ha permesso di ottenere un momento motore sufficientemente grande da garantire un funzionamento regolare del sistema, a scapito ovviamente della velocità di posizionamento, che però non deve essere elevata. Sempre per il rapporto di riduzione, ad un giro completo della madrevite ne corrispondono due del motore e quindi 400 passi anziché 200; conseguentemente, ad ogni singolo passo, la torcia avanza di 0,0125 mm piuttosto che 0,0250 mm.

Tenendo presente che i motori passo-passo non ruotano con continuità ma per numero discreto di step, la risoluzione del posizionamento, intesa come il più piccolo spostamento che è possibile far compiere alla torcia risulta in questo modo doppia, rispetto al caso di accoppiamento diretto. Nell'installare sia i motori che il sistema di trasmissione si è deciso di non rimuovere i volantini previsti originariamente sulle slitte, risultando questi comunque necessari qualora si decidesse di non utilizzare il sistema di controllo elettronico ma di ricorrere ad un posizionamento manuale.

Oltre ai componenti di cui si è detto, su entrambe le slitte sono stati installati anche due *interruttori di fine corsa*. Questi non hanno solo lo scopo di bloccare il sistema qualora giungesse in una posizione limite, ma servono principalmente a fornire al sistema di controllo un punto di riferimento assoluto. Così all'avvio del programma LabVIEW 8.0, che gestisce il posizionamento della torcia, viene compiuta una operazione di *start-up*, ossia vengono azionate le slitte in direzione dei relativi fine corsa fino al loro raggiungimento. Il sistema infatti, non avendo alcun tipo di encoder assoluto sulle slitte, non è in grado di valutare la loro posizione iniziale. A questo punto, il programma fissa lo zero del suo sistema di riferimento, che quindi coincide col punto in cui vengono toccati entrambi i finecorsa e termina la fase di start up; il sistema è quindi pronto a portarsi nella posizione che gli viene ordinata.

Le prove di posizionamento, eseguite per testare l'effettiva precisione del sistema, hanno rilevato un errore massimo di 0,1 mm, dovuto ai giochi presenti tra vite a madrevite di cui si è però previsto il recupero via software ogni volta che si inverte il verso di avanzamento.

3.2.6 – Il sensore di tensione

Il generatore Miller 456 CC/CV è già di per se in grado di misurare la tensione d'arco, il suo valore è immediatamente leggibile su un apposito display. In realtà però, più che misurare l'effettiva tensione d'arco, l'unità fornisce una misura della differenza di potenziale ai suoi morsetti. I cavi elettrici che collegano il generatore alla torcia, non proprio cortissimi, anche se caratterizzati da una resistenza trascurabile rispetto a quella dell'arco elettrico, dati gli alti valori dell'intensità di corrente in gioco, portano comunque ad una caduta di tensione non del tutto trascurabile (mediamente intorno al 4%).

La misura effettuata dal generatore, inoltre, a meno di sostanziali modifiche dello stesso, non può essere trasmessa al sistema di acquisizione. Per questi motivi, si è utilizzato un sensore prodotto dalla Computer Weld technology riportato nella Figura 3.14.



Figura 3.14 – Sensore di tensione Computer Weld Technology

Questo è installato in prossimità del gruppo di trascinamento del filo e tramite due morsetti misura la tensione tra il cavo di alimentazione della torcia e la massa, fornendo, data la minore lunghezza del conduttore che lo separa dall'arco, una misura più precisa di quella del generatore. Lo strumento è un accessorio della centralina di acquisizione ADM III dello stesso produttore, già presente nell'impianto prima dell'intervento, il collegamento con questa è realizzato a mezzo di un unico connettore del tipo DIN a cinque pin.

Il pin out presente sul relativo foglio tecnico chiarisce la funzione di ciascun pin. Due servono per l'alimentazione del sensore (24 volt DC), altri due forniscono un segnale in tensione (0-10V DC) proporzionale alla grandezza misurata, quello restante è collegato con lo schermo del cavo di collegamento.

La realizzazione del sistema di acquisizione e controllo che si è sviluppato, di fatto, rende superflua la presenza della centralina ADM III, tuttavia, si è scelto di non eliminarla per due importanti ragioni:

1. In quanto è possibile confrontare la misure fornite dai due sistemi e rilevare facilmente eventuali anomalie.
2. In quanto essa provvede ad alimentare tutti i sensori. In mancanza della centralina, si sarebbe dovuto realizzare un nuovo alimentatore.

Sul cavo di collegamento tra centralina e sensore, immediatamente vicino a quest'ultimo, è stata inserita, perciò, una piccola prolunga, di pochi centimetri, che lasciando passare tutti e cinque i poli, intercetta il segnale in tensione fornito dal sensore inviandolo anche alla scheda di acquisizione della National Instruments.

3.2.7 – Il sensore di corrente

Come per la tensione d'arco, il generatore Miller visualizza su un apposito display il valore della corrente rilevato. A differenza, però, della misura della tensione, in questo caso, il valore misurato è privo di qualsiasi errore: il circuito elettrico costituito da generatore, cavi di collegamento, elettrodo, arco e pezzi da saldare è costituito infatti da un'unica maglia chiusa per cui la corrente che attraversa ogni singolo componente è la stessa.

Il problema della trasmissione della misura al sistema di acquisizione comunque rimane. Si è scelto quindi, anche per questo parametro, di ricorrere ad uno strumento dedicato. Il sensore in questione, riportato in Figura 3.15 è anch'esso della Computer Weld Technology ed è abbinato alla centralina ADM III.



Figura 3.15 – Sensore di corrente della Computer Weld Technology

Il suo funzionamento si basa sulla legge di Ohm: $V = R \cdot I$

La corrente nell'attraversare un elemento conduttore di resistenza nota, genera una differenza di potenziale ai suoi capi, la misura di questa tensione, permette di risalire al valore di I .

Nel caso specifico, la tensione che si viene a creare è dell'ordine di pochi millivolt ed è necessario un circuito che la elevi a valori compatibili con l'ingresso della centralina di acquisizione. Il sensore è inserito nel circuito in corrispondenza di uno dei morsetti del generatore e presenta un connettore a 5 pin di tipo Din per la connessione con la centralina. Come per il sensore di tensione, due pin sono usati per l'alimentazione, due portano il segnale in tensione (0-10V) proporzionale alla corrente misurata, uno è collegato con lo schermo del cavo di collegamento.

Allo scopo di intercettare il segnale 0–10V proporzionale alla corrente misurata, si è inserita, sul cavo di collegamento fra sensore e centralina una piccola prolunga (Figura 3.16) che deriva questo segnale mandandolo, in questo modo, contemporaneamente alla centralina ADM III ed al nostro sistema di acquisizione.



Figura 3.16 – Il sensore di corrente e la prolunga di derivazione del segnale

È importante sottolineare che l'aver collegato in parallelo, sullo stesso sensore, l'ingresso della centralina della Computer Weld Technology e quello del sistema sviluppato non genera nessun tipo di errore nella misura. Entrambi gli ingressi, infatti, sono ad alta impedenza e quindi non alterano in alcun modo il segnale fornito dal sensore. Questo vale sia per i segnali in tensione forniti dai sensori di tensione, corrente e gas, sia per quelli TTL 5V generati dagli encoder.

3.2.8 – Il sensore di velocità del filo

Come è già stato accennato nel paragrafo riguardante il gruppo trascinamento del filo, per la misura della velocità di avanzamento del filo si è sfruttato l'encoder ottico già presente nell'unità della Miller. C'è da aggiungere che il segnale fornito da questo, così com'è, non è compatibile ne con la centralina ADM III, ne col nostro sistema di acquisizione. Il valore della tensione originario è 0-15V, per i nostri scopi invece, occorre un segnale 5V TTL, le

frequenze, inoltre, sono troppo basse per la centralina di acquisizione. Un circuito elettronico esterno provvede ad adattare il segnale, portando sia la tensione che la frequenza a valori adatti, un piccolo potenziometro esterno permette di tarare finemente il valore della frequenza del segnale in uscita (Figura 3.17).

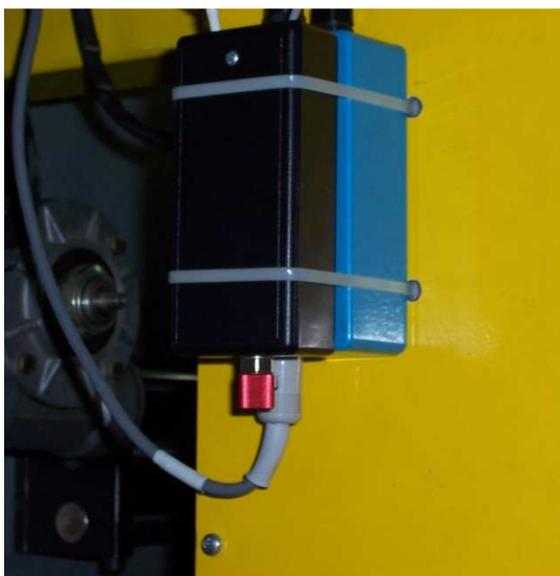


Figura 3.17 – Circuito di adattamento del segnale con potenziometro di taratura

3.2.9 – Il sensore di velocità della torcia lungo l’asse longitudinale

La velocità di avanzamento longitudinale della torcia viene rilevata da un encoder ottico di tipo incrementale con risoluzione di 1024 impulsi/giro. Questo è stato montato sul carro motorizzato che porta la torcia di saldatura, per mezzo di una staffetta di alluminio che, essendo precaricata elasticamente, serve, oltre che a sorreggerlo, anche a mantenerlo costantemente in contatto con la traversa su cui scorre il carro. La Figura 3.18 mostra l’encoder ottico utilizzato.

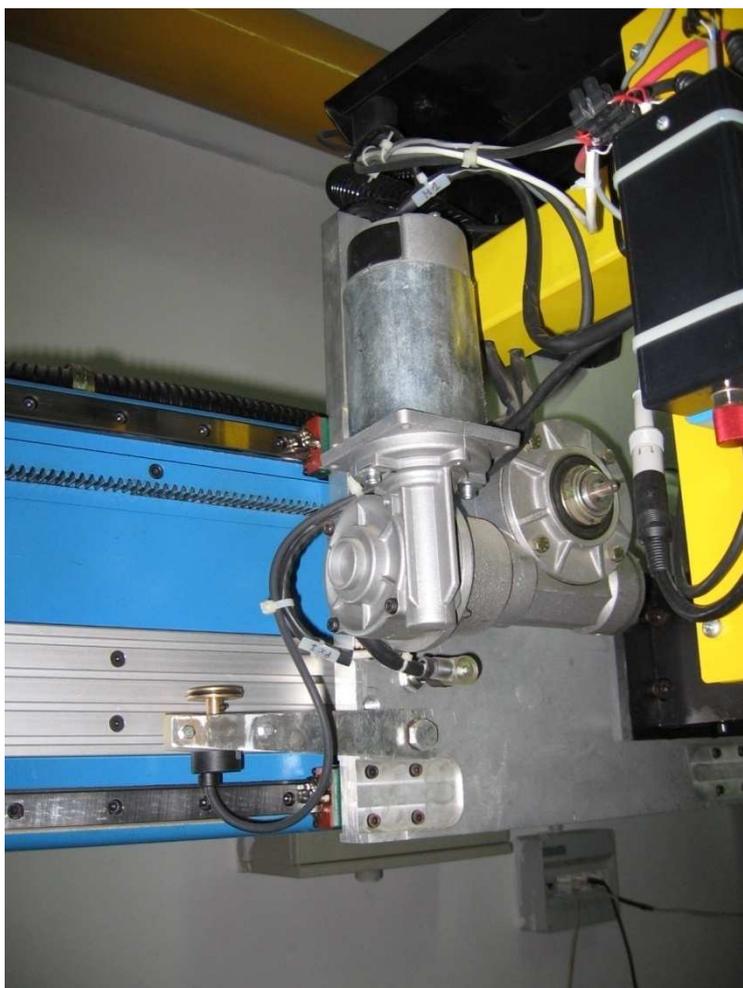


Figura 3.18 – Encoder ottico di tipo incrementale utilizzato per la misura della velocità di avanzamento della torcia

Durante il movimento, la rotellina di cui è provvisto l'encoder, dotata peraltro di un anello in gomma per migliorarne l'aderenza, cammina sulla traversa facendo ruotare l'asse dell'encoder che così genera un segnale *TTL* (*Transistor-Transistor Logic*) di frequenza proporzionale alla velocità di traslazione. Conoscendo il diametro della rotellina ed il numero di impulsi corrispondenti ad un giro completo di questa è facile trovare per via analitica la relazione che lega la frequenza del segnale alla velocità di avanzamento:

$$Velocità\ di\ avanzamento = \frac{Frequenza \cdot \pi \cdot Diametro\ rotella}{Numero\ di\ impulsi\ per\ giro} \quad (2.1)$$

Il diametro che si dovrebbe considerare, in realtà, è quello dell'anello di gomma, essendo questo l'elemento di contatto. Tuttavia a causa della forza di chiusura, questo si deforma e la determinazione del suo diametro è tutt'altro che immediata. Si è preferito, perciò, trovare la relazione che lega la frequenza alla velocità in modo sperimentale per mezzo di una serie di prove cronometrate. L'encoder scelto, prodotto dalla svizzera Baumer, fornisce in uscita tre segnali diversi, tutti *TTL* mostrati nella Figura 3.19.

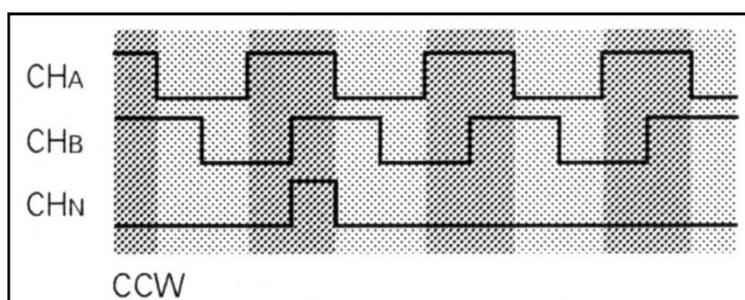


Figura 3.19 – Segnali in uscita dall'encoder

Nell'eventualità in cui, oltre che la velocità, si volesse valutare anche il verso di rotazione è necessario, infatti, un secondo segnale che, a seconda si trovi in anticipo o in ritardo rispetto al primo, indica un senso di rotazione orario o antiorario. Per la nostra applicazione, volendo stimare soltanto la velocità si è utilizzato soltanto il primo canale (CH_A).

3.2.10 – Il miscelatore di gas con misura di portata

Nell'impianto è presente un miscelatore capace di combinare nelle proporzioni desiderate fino a quattro gas differenti :

- ANIDRIDE CARBONICA
- AZOTO
- ARGON
- OSSIGENO



Figura 3.20 – Il miscelatore dei gas di protezione

Il sistema, mostrato in Figura 3.20, è basato sulla legge di Dalton in base alla quale il titolo di ogni singolo gas componente è proporzionale alla relativa pressione parziale, sono previsti quindi quattro regolatori di pressione, uno per ogni gas, che permettono di sceglierne la percentuale nella miscela in uscita.

Un sistema di elettrovalvole permette di scegliere, tramite una centralina di controllo quali dei quattro gas miscelare.

Sempre all'interno del miscelatore, è presente un flussometro prodotto da Honeywell (Figura 3.21) di cui si riporta anche la curva di funzionamento.

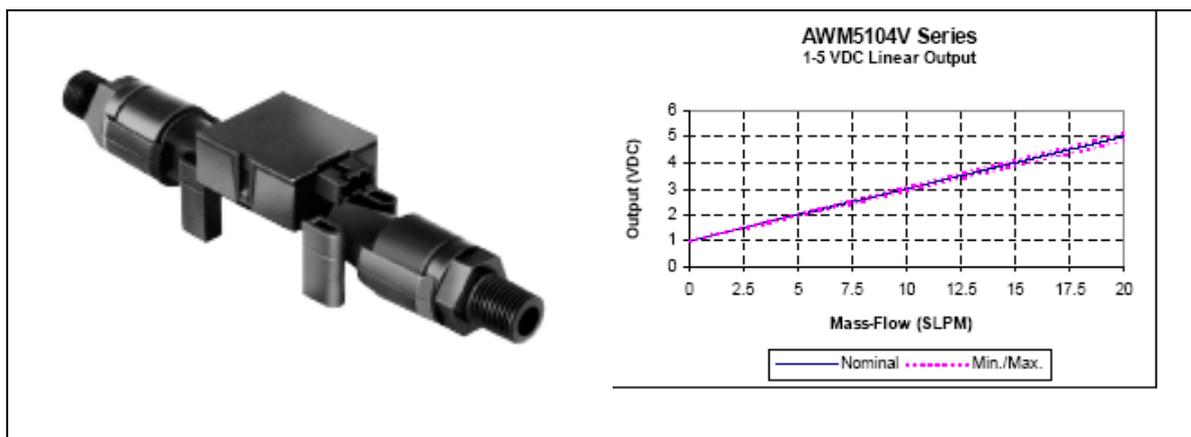


Figura 3.21 - Flussometro Honeywell e relativa curva di funzionamento

Il segnale da esso generato, opportunamente condizionato, viene trasmesso all'esterno ed acquisito, tramite il modulo National Instruments, dal nostro sistema. In particolare la tensione in uscita dal sensore viene innalzata e portata in un range 1–10V tramite un circuito elettronico che permette tra l'altro di tarare con precisione il sistema.

3.2.12 – La scheda di acquisizione dati

Componente essenziale per lo sviluppo del nostro sistema di acquisizione e controllo è la scheda *NI 6229* prodotta da National Instrument. Essa consente al computer di acquisire e controllare tutti i segnali elettrici che regolano il funzionamento dell'impianto di saldatura. L'azienda produttrice offre una vastissima gamma di prodotti orientati al controllo e alla gestione di processi industriali. Molte delle soluzioni proposte prevedono l'utilizzo di calcolatori e sistemi operativi dedicati e sviluppati all'interno della stessa azienda. La mole di dati da elaborare, infatti, in tali applicazioni diventa così grande da non poter essere gestita da un comune *PC* operante in ambiente Windows, soprattutto se si intende implementare un controllo di tipo *real-time*. I costi di queste soluzioni,

ovviamente, sono tutt'altro che contenuti e ovviamente non compatibili con una realizzazione *low-cost* alla quale si è puntato. Fortunatamente, nel caso dell'impianto *GMAW* sul quale si è operato, la quantità di parametri da gestire non è così elevata da richiedere necessariamente una soluzione di questo tipo. La scheda *NI 6229* è un prodotto di fascia *entry level* ed è installabile sul bus *PCI* di un comune PC con sistema operativo *Windows*. A corredo della scheda, vengono fornite due robuste morsettiere, ovviamente schermate, che opportunamente collegate a questa, permettono di effettuare comodamente i vari collegamenti elettrici tra scheda e mondo esterno; è bastato, comunque, usarne una soltanto di esse. Essendo una scheda di tipo *multipurpose*, pensata cioè per soddisfare le esigenze più disparate, essa dispone di ingressi ed uscite di vario tipo.

3.2.13 – La centralina elettronica di controllo gestita da PC

La centralina elettronica di controllo visibile nella Figura 3.23, racchiude al suo interno gran parte dell'hardware che è stato necessario realizzare per poter controllare l'impianto di saldatura anche dal computer. In seguito alle modifiche apportate questo può essere controllato, quindi, sia dal programma che si è appositamente sviluppato, sia manualmente, tramite i comandi ausiliari presenti sulla centralina stessa oppure sfruttando i comandi originariamente presenti, il cui funzionamento è stato conservato.

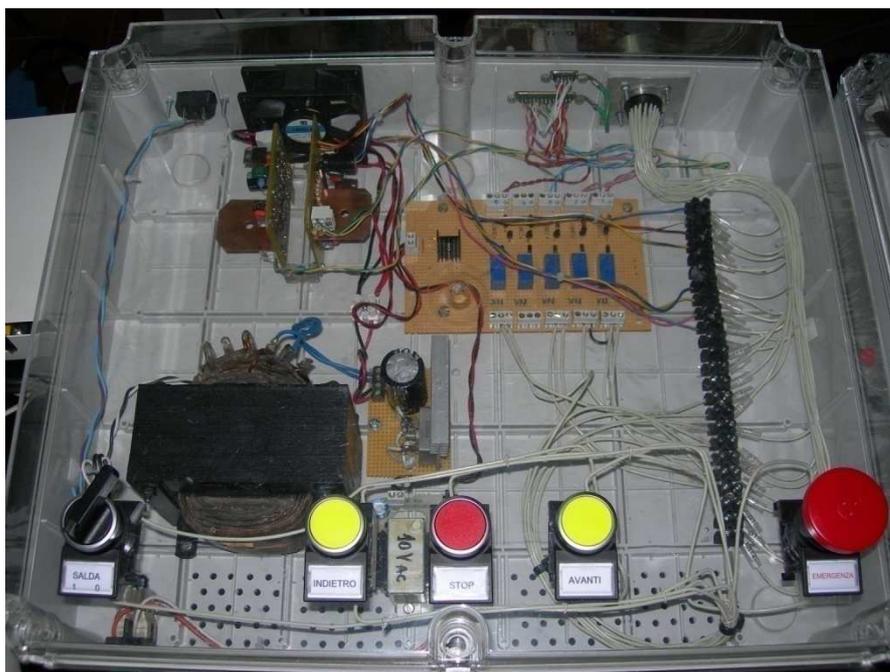


Figura 3.23 – La centralina elettronica di controllo

Per la sua realizzazione è stata sfruttata una cassetta in *PVC* con coperchio trasparente in plexiglas prodotta dalla *GEWISS*, che ne lascia intravedere il contenuto.

La centralina può essere scomposta, in base alla funzione svolta da ognuna di esse, nelle sue parti costituenti:

- alimentatore;
- due schede per il controllo dei motori stepper del sistema di movimentazione ausiliario della torcia;
- una scheda per l'azionamento di quattro differenti relays;
- ventola di raffreddamento;
- pulsanti per il controllo manuale;
- connettori di collegamento.

I motori passo-passo

I motori passo-passo, noti anche come motori stepper, come lascia intuire lo stesso nome, non si muovono in modo continuo ma si muovono a passi discreti di pochi gradi per volta. In quelli utilizzati nella nostra applicazione ogni step corrisponde a 1,8 gradi; per un giro completo del loro asse sono quindi necessari 200 steps. Il particolare tipo di funzionamento richiede, rispetto ai classici motori a corrente continua o alternata, un circuito elettronico di pilotaggio di tipo digitale. Un motore di questo tipo è costituito, come si vede dalla Figura 3.25, da un rotore e uno statore di struttura particolare.



Figura 3.25 – Motore stepper (smontato) utilizzato

Il rotore appare come una coppia di ruote dentate solidali all'albero; il numero di denti (coppette) per ciascuna di esse è pari, solitamente, a cinquanta. Queste sono permanentemente magnetizzate in modo opposto e sfasate tra loro di un angolo pari a mezzo passo della dentatura. Nel rotore non sono presenti fili elettrici e quindi non è presente alcuna connessione elettrica tra la parte fissa e quella mobile. Il rotore, anche nei modelli più economici è montato su cuscinetti a sfera. Lo statore appare come il classico insieme di avvolgimenti ed il circuito magnetico è costituito da otto espansioni polari. All'interno dello statore sono

presenti dei piccoli denti che si affacciano esattamente a quelli del rotore. Ad essere precisi, sono esattamente affacciati al rotore solo il gruppo di denti appartenenti ad una espansione polare e a quella opposta: le altre coppie sono sfalsate rispettivamente di $1/2$, $1/4$ e di $3/4$ del passo dei denti. I fili avvolti intorno ai poli magnetici, che al passaggio della corrente generano il campo magnetico, possono essere collegati secondo diversi schemi:

- Sono presenti due soli avvolgimenti (fasi), avvolti ovviamente su più espansioni polari; all'esterno arrivano soltanto due coppie di fili ed il motore è detto di tipo bipolare.
- Sono presenti quattro avvolgimenti avvolti a coppie, in antiparallelo, sulle espansioni polari; all'esterno arrivano almeno cinque fili ed il motore è detto di tipo unipolare.

Se gli avvolgimenti statorici di un motore stepper vengono semplicemente eccitati, per come questo è realizzato, il suo asse, piuttosto che mettersi a ruotare si porta in una posizione di equilibrio e vi rimane indefinitamente. Si capisce, dunque, che per mettere in rotazione un motore di questo tipo occorre che le fasi siano alimentate sequenzialmente.

La scheda di controllo per i motori stepper

La scheda driver ha il compito di alimentare le fasi del motore stepper con una opportuna sequenza e polarità affinché questo avanzi nella direzione desiderata del numero di passi richiesti e con una precisa velocità. A seconda del tipo di motore, ovviamente, è necessario uno specifico tipo di controller. Essendo i motori da noi utilizzati di tipo bipolare, sono necessari driver analoghi. Inizialmente, data la grande varietà di prodotti disponibili in commercio, si era

optato per il loro acquisto, successivamente però, vista la non eccessiva complessità di realizzazione, si è deciso di realizzarli in proprio. Componente principale della scheda driver realizzata, alla base anche di molti prodotti commerciali, è l'integrato *L6208* prodotto da *ST*.

L'integrato raccoglie al suo interno quasi tutto il necessario per il pilotaggio del motore, dalla logica che genera la sequenza di alimentazione delle fasi all'elettronica di potenza con i relativi circuiti di protezione contro le sovracorrenti e l'eccessivo riscaldamento. Essendo, quindi, la maggior parte delle funzioni svolte dall' *L6208*, la scheda è composta complessivamente da non molti componenti.

L'*L6802* può operare in due diverse modalità: *half step* e *full step*; collegando il pin *I2* a +5V si è impostata la prima di queste. In questo modo il motore avanza di mezzo step per volta permettendo un posizionamento più accurato.

Per il montaggio dei componenti, piuttosto che utilizzare una scheda per prototipi di tipo millefiori, che avrebbe portato ad una realizzazione alquanto disordinata, si è preferito realizzare uno stampato ad hoc. La tecnica che si è sfruttata è quella della fotoincisione ed il disegno delle piste è stato sviluppato in modo tale da realizzare uno stampato a singola faccia.

La Figura 3.26 mostra come appaiono le schede driver e la relativa ventola di raffreddamento all'interno della centralina. Da notare le alette in rame necessarie a dissipare la potenza termica sviluppata.

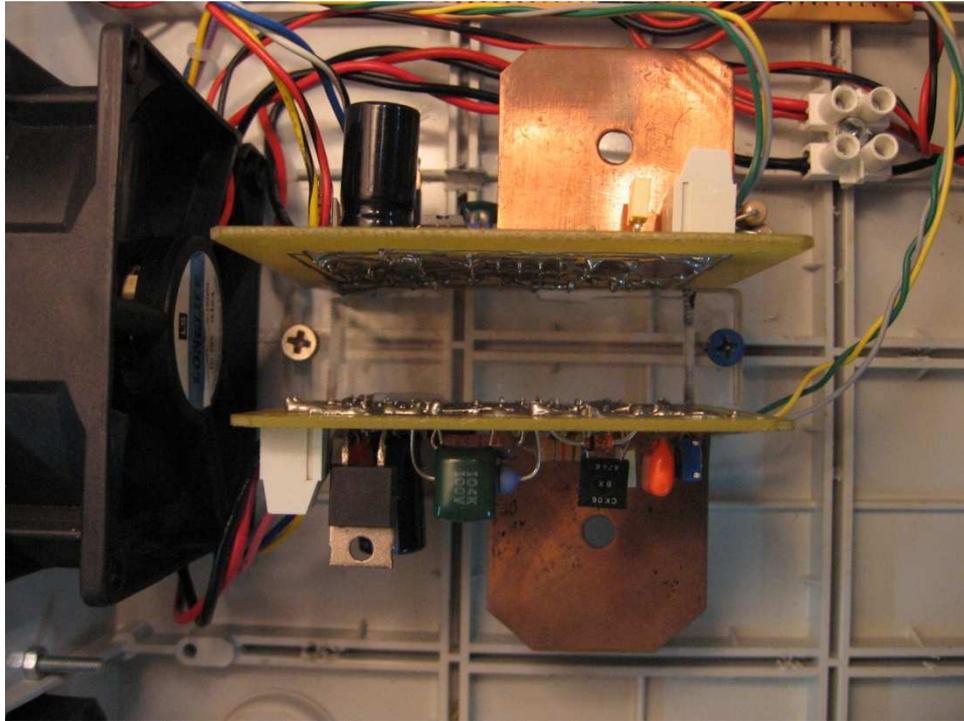


Figura 3.26 - Schede driver e relativa ventola di raffreddamento

Scheda per l'azionamento dei relays

Dover controllare il carro motorizzato della FRO dal PC ha reso necessario l'utilizzo di alcuni relays che, controllati dal software tramite la scheda NI 6229, sostituiscono l'azione manuale compiuta normalmente dal quadro di comando frontale. Questi sono complessivamente quattro e vanno, ovviamente, a bypassare altrettanti comandi manuali:

- AVANTI
- STOP
- INDIETRO
- SALDA

Pulsanti per il controllo manuale

Nonostante la funzione principale della centralina sia quella di rendere possibile il controllo dell'impianto da pc grazie all'apposito programma, si è pensato di dotarla, comunque, di una serie di pulsanti per il controllo manuale.

Sul coperchio trasparente in plexiglas sono stati quindi installati i seguenti elementi, tutti di tipo industriale :

- Un commutatore per la selezione della modalità *SALDA*
- Un pulsante per il comando *AVANTI*
- Un pulsante per il comando *STOP*
- Un pulsante per il comando *INDIETRO*
- Un interruttore di *EMERGENZA*

La funzione svolta da questi, ovviamente, è la stessa degli analoghi presenti sul quadro di controllo del carro motorizzato. Questi ultimi hanno l'inconveniente di trovarsi troppo vicini alla torcia di saldatura ed è tutt'altro che improbabile che chi si trovi ad azionarli venga colpito da qualche schizzo incandescente.

Oltre questo motivo, comunque non secondario, c'è la necessità, per chi si trova ad operare da PC, di poter tempestivamente intervenire manualmente in caso di malfunzionamento del sistema di controllo gestito via software. Per come sono stati inseriti nel circuito, infatti, i comandi ausiliari presenti sulla centralina, soprattutto quello di emergenza, sono sempre attivi, anche quando è il computer a gestire l'impianto.

3.3 – Il sistema di visione

Il sistema di visione che si è deciso di installare sull'impianto già esistente è costituito fondamentalmente da due unità:

- Una videocamera
- Un sistema di illuminazione

Di entrambi queste unità si daranno ora alcuni cenni.

3.3.1 – Le videocamere

Nel mondo delle videocamere oggi si assiste al declino dell'analogico (per la verità non rapidissimo) a favore dei nuovi standard digitali: *USB2*, *Gigabit Ethernet*, *FireWire (IEEE 1394)* e *Camera Link* e ad un generale aumento della risoluzione spaziale dei sensori. Il digitale ha anche contribuito all'adozione di sistemi a *intelligenza distribuita*, trend che è valido anche in altri ambiti quali l'acquisizione dati, il controllo, e la movimentazione multiasse.

Alla famiglia di dispositivi atti all'acquisizione di immagini dal mondo reale, appartengono:

- scanner
- fotocamere e videocamere digitali.

Tutti questi strumenti sono accomunati dal fatto che l'acquisizione avviene attraverso un dispositivo elettronico di silicio in grado di tradurre i segnali elettromagnetici (la luce) emessi dagli oggetti in segnali elettrici facilmente manipolabili. Questi sensori sono i *CCD*, i quali variano in base alle loro caratteristiche.

I **CCD** (charged couple device – dispositivo ad accoppiamento di carica) sono dei sensori utilizzati in vari sistemi di acquisizione immagine (videocamere, fotocamere digitali, scanner) in grado di trasformare la luce in un segnale elettronico. Essi sono costituiti da un gran numero di elementi base detti *pixel*. Ogni pixel è composto da due parti: un fotodiodo che trasforma la luce che lo colpisce in una carica elettrica proporzionale alla quantità di luce stessa e un CTR (charge transfer region – aria di trasferimento della carica) dove le cariche vengono raccolte e “lette” da dispositivi di lettura orizzontale e verticale. Ogni carica viene successivamente trasformata in un segnale elettrico caratterizzato da un voltaggio dipendente dalla luce che ha colpito il fotodiodo corrispondente. Questo segnale debolissimo deve essere amplificato e poi trasferito con cavi, od altro, ad altri apparecchi. Maggiore è il numero di pixel di un sensore più definita sarà l’immagine.

I costi sono elevatissimi per le piccolissime dimensioni dei sensori e per la grande precisione necessaria alla loro lavorazione.

Per avere un’immagine a colori è necessario avere 3 CCD uno per il rosso, uno per il verde, uno per il blu. Si utilizza a tal scopo, la tecnologia X3 che sfrutta 3 CCD posti in orizzontale dall’obiettivo al fondo della macchina.

Una variante dei CCD sono i sensori **CMOS** basati sui MOS (Metal Oxide Semiconductor). Il CMOS contiene il fotodiodo, il dispositivo che trasforma la carica elettrica in corrente e l’amplificazione del segnale. L’accoppiamento di più MOS dà vita al CMOS (Complementary Oxide Semiconductor).

Gli unici vantaggi dei CMOS rispetto ai CCD sono: l’economicità (in quanto non richiedono dispositivi supplementari) ed il basso consumo di corrente.

Il passaggio della microelettronica dei sensori da *CCD* a *CMOS* (questa ultima è la tecnologia utilizzata nella fabbricazione di quasi tutto il mondo dei *CIP* elettronici fino ai più potenti e diffusi processori) è stato (ed è tutt'ora) lento per la difficoltà di ottenere la stessa qualità intrinseca dei sensori *CCD*, ma è fortemente motivato per questioni di riduzione dei costi, e velocità operativa dei sensori, dovuta alla possibilità di accedere in modo random (come per le memorie *RAM*) a sub-aree specifiche del sensore, e soprattutto alla possibilità di integrare sullo stesso substrato e quindi in un solo processo sensore e processore.

Per videocamere e fotocamere è importante saper il numero di pixels che il sensore ottico fisicamente ha, poiché, mentre in uno scanner per l'acquisizione di immagini, il sensore scansiona l'immagine un poco per volta fino a che la scansione non è completa, per gli altri due dispositivi si deve avere un sensore in grado di catturare in maniera istantanea e alla risoluzione voluta l'intera immagine.

I parametri fondamentali di cui bisogna tener conto per queste periferiche sono fondamentalmente due:

- La *RISOLUZIONE OTTICA* che rappresenta ciò che il sensore riesce a vedere, si misura in *dpi* (dot per inch) ossia punti per pollice che riesce a distinguere e ciò rappresenta la digitalizzazione dell'immagine.
- La *PROFONDITÀ DI COLORE*, caratteristica che dipende dalla qualità del *CCD*, maggiore è la profondità di colore e migliore sarà la capacità di distinzione tra sfumature di uno stesso colore e quindi maggiore la precisione del valore numerico assegnatagli. Il numero dei bit che viene usato per rappresentare il colore di un pixel è detto *profondità*. Per esempio se il numero di bit è 16 il *CCD* sarà in grado di distinguere 2^{16} colori.

In generale più l'immagine acquisita è ricca di informazioni, migliore sarà il risultato degli algoritmi che ne ricercano le caratteristiche (come l'edge detection).

Oggigiorno ferve la discussione sulle *smart-camera*, essenzialmente videocamere, che inglobano al loro interno la parte di processing/intelligenza e sono interfacciabili direttamente all'impianto. Il problema è essenzialmente quello della miniaturizzazione e di come generare il software di programmazione e configurazione della smart-camera. Separare il sensore dal processore continua ad offrire una maggiore flessibilità in termini di risoluzione, velocità, colore. Il limite inferiore delle smart-cameras è dovuto agli *smart vision sensor*: dei sensori dedicati, basati sull'acquisizione immagine, con capacità specifiche (ma limitate).

Nella Figura 3.27 è riportata una tabella con i campi di utilizzo di videocamere tipo firewire utilizzabili col nostro ambiente di sviluppo (*VA*, *VB*, *LV*, *IMAQ for LV*):

Firewire Bandwidth Allocation											
Supported			Not Supported as of IMAQ 1394 v1.5								
Defined in IIDC v1.3			Proposed in IIDC v1.31 (<=400Mbps)								
			>400Mbps								
100Mbps = 1024 Bytes/packet											
200Mbps = 2048 Bytes/packet											
400Mbps = 4096 Bytes/packet											
800Mbps = 8192 Bytes/packet											
1600Mbps = 16384 Bytes/packet											
3200Mbps = 32768 Bytes/packet											
General guidelines to achieve maximum bandwidth:											
Cumulative packet size from all cameras must not exceed approximately 4096 bytes.											
For example: 2 cameras in Format 0, Mode 3, can theoretically achieve 15 frames per second.											
both cameras at 15 frames/second: $1280 * 2 = 2560$ is less than 4096 and therefore possible											
both cameras at 30 frames/second: $2560 * 2 = 5120$ is greater than 4096 and therefore not possible											
one at 15 frames/second and one at 30 frames/second = $1280 + 2560 = 3840$ is less than 4096 and therefore possible											
Bytes per packet											
Format	Mode	Image Type	Frames per second								
			240	120	60	30	15	7,5	3,75	1,875	
0	0	160x120 YUV (4:4:4)	1920	960	480	240	120	60			
	1	320x240 YUV (4:2:2)	5120	2560	1280	640	320	160	80	40	
	2	640x480 YUV (4:1:1)	15360	7880	3840	1920	960	480	240	120	
	3	640x480 YUV (4:2:2)	20480	10240	5120	2560	1280	640	320	160	
	4	640x480 RGB	30720	15360	7860	3840	1920	960	480	240	
	5	640x480 Y (Mono 8)	10240	5120	2560	1280	640	320	160	80	
	6	640x480 Y (Mono 16)	20480	10240	5120	2560	1280	640	320	160	
1	0	800x600 YUV (4:2:2)	32000	16000	8000	4000	2000	1000	500		
	1	800x600 RGB		24000	12000	6000	3000	1500			
	2	800x600 Y (Mono 8)	16000	8000	4000	2000	1000	500			
2	3	1024x768 YUV (4:2:2)		24576	12288	6144	3072	1536	768	384	
	4	1024x768 RGB			18432	9216	4608	2304	1152	576	
	5	1024x768 Y (Mono 8)	24576	12288	6144	3072	1536	768	384	192	
	6	800x600 Y (Mono 16)	32000	16000	8000	4000	2000	1000	500		
	7	1024x768 Y (Mono 16)		24576	12288	6144	3072	1536	768	384	
	0	1280x960 YUV (4:2:2)			20480	10240	5120	2560	1280	640	320
	1	1280x960 RGB			30720	15360	7860	3840	1920	960	
3	2	1280x960 Y (Mono 8)		20480	10240	5120	2560	1280	640	320	
	3	1600x1200 YUV (4:2:2)			32000	16000	8000	4000	2000	1000	
	4	1600x1200 RGB				24000	12000	6000	3000	1500	
	5	1600x1200 Y (Mono 8)		32000	16000	8000	4000	2000	1000	500	
	6	1280x960 Y (Mono 16)			20480	10240	5120	2560	1280	640	
	7	1600x1200 Y (Mono 16)			32000	16000	8000	4000	2000	1000	

Figura 3.27 - Campi di utilizzo di videocamere tipo firewire utilizzabili col nostro ambiente di sviluppo (VA, VB, LV, IMAQ for LV)

3.3.1.1 – La videocamera GUPPY F-033C

Per la scelta della videocamera è stata quindi effettuata un'accurata analisi di mercato al termine della quale si è ritenuto opportuno scegliere un prodotto della *ALLIED VISION TECHNOLOGIES*, e più precisamente il modello *GUPPY F-033C*.

La videocamera scelta, che presenta un sensore CCD a colori ed una risoluzione di 658x494 pixel, è riportata nella Figura 3.28.



Figura 3.28 – La videocamera GUPPY F-033C

Tale telecamera è dotata inoltre di un interfaccia del tipo IEEE1394a per la comunicazione con il PC, un Transfer Rates regolabile da 100, 200, 400 Mbit/s, un Frame Rates di oltre 60fps. Caratteristiche più dettagliate della videocamera in esame sono poi riportate nella Figura 3.29.

Camera Specifications

	GUPPY F-033B (b/w)	GUPPY F-033C (color)
Image Device	1/3" (Diag. 6mm) progressive scan, SONY Wfine CCD	
Effective Picture Elements	658 (H) x 494 (V)	
Picture Size	658 (H) x 494 (V) (all modes and color formats)	
Cell Size	7.4µm x 7.4µm	
Resolution Depth	8 Bit (10 Bit ADC)	
Lens Mount	C-Mount, CS-Mount (convertable via adapter)	
Digital Interface	IEEE1394a, Single Port	
Transfer Rate	100, 200, 400 Mbit/s	
Frame Rates	up to 60fps	
Gain Control	Manual: 0-24 dB; Auto Gain	
Shutter Speed	20µs ... 67s, Auto Shutter, Level Mode	
External Trigger Shutter	Programmable, Trigger-Level-Controlled Single Trigger, Bulk Trigger, Programmable Trigger Delay	
Smart Features	AGC, AEC, AWB, LUT, 1 progr. Input / 3 progr. Outputs, RS-232 Port, etc.	
Power Requirements	DC 8 – 36V (via IEEE1394 port or HIROSE)	
Power Consumption	Less than 2 Watt (@ 12V DC)	
Dimensions	30mm x 30mm x 47mm (incl. Connectors, without lens)	
Mass	< 50 g (without lens)	
Operating Temperature	+5°C ... + 45°C (non condensing)	
Storage Temperature	-10°C ... + 60°C (non condensing)	
Regulations	EN 55022, EN61000, EN55024, FCC Class B, DIN ISO 9022, ROHS in preparation	
Options	Board Level Version, Power Out (Hirose), APIs, DirectX, Linux, etc.	

Figura 3.29 – Caratteristiche tecniche della videocamera GUPPY F-033C

Insieme alla videocamera, provvista di obiettivo, è stata acquistata un'ottica dedicata, e che consente di ottenere una bassissima distorsione dell'immagine per evitare una percezione distorta della zona di lavoro. Si tratta di un obiettivo della *V.S. Technology* modello *LV0814*, riportato nella Figura 3.30.



Figura 3.30 – Obiettivo della V.S Technology modello LV0814

Per maggiore chiarezza nella Figura 3.31 si riporta la dettagliata scheda tecnica dell'ottica acquistata per questo studio.

LV0814	
2/3" Image Format	
f=8mm	
F= 1 : 1.4	
View Angle on 2/3" sensor (1/2" sensor) :	
Horizontal :	56.5° (42.6°) ↘
Vertical :	43.9° (32.5°) ↘
Diagonal :	67.0° (52.1°) ↘
MOD (Minimum Object Distance): 0.1m	
Object Size at MOD on 2/3" sensor (1/2" sensor)	
Horizontal :	117.3mm (85.3mm)
Vertical :	88.0mm (64.0mm)
Diameter :	146.6mm (106.6mm)
Distortion on 2/3" sensor:*	
Back Focus :	9.5mm in air
Filter Screw :	M27.0 P=0.5
C-Mount	
Flange Back :	17.526mm
Dimension :*
Weight :	83g

Figura 3.31 – La scheda tecnica dell'obiettivo della V.S Technology modello LV0814

3.3.2 – Il sistema di illuminazione

In commercio esiste una ampia gamma di sistemi di illuminazione che dovrebbero rispondere in modo adeguato alle varie caratteristiche di illuminazione del pezzo, nonché alle condizioni di illuminazione dell'ambiente. Nella gamma dei moduli di illuminazione visti nel corso delle ricerche, hanno riscosso interesse i seguenti:

- *moduli di illuminazione ad anello* a neon o a led, particolarmente indicati per una illuminazione pseudoassiale soft da tutte le direzioni come mostrato nella Figura 3.32.



Figura 3.32 – Moduli di illuminazione ad anello a led

I *led* che hanno grande durata, e luminosità, hanno anche la proprietà di avere una lunghezza d'onda che coincide con il picco di rilevazione della maggior parte delle telecamere in bianco e nero. Inoltre è anche importante che il *coefficiente di diffusione* del led sia elevato in modo da ridurre l'effetto ad anello concentrico tipico di alcuni led. Esistono led a luce colorata utilizzabili per illuminare diverse superfici, operando praticamente come filtri, e led infrarossi che illuminano al buio senza poter essere percepiti dall'occhio umano. Questi ultimi necessitano però di telecamere con sensore infrarosso dal costo lievemente maggiore rispetto quelle normali.

Ci sono poi:

- moduli di *retroilluminazione* per il massimo contrasto tra il pezzo e il suo sfondo come quelli in Figura 3.33.

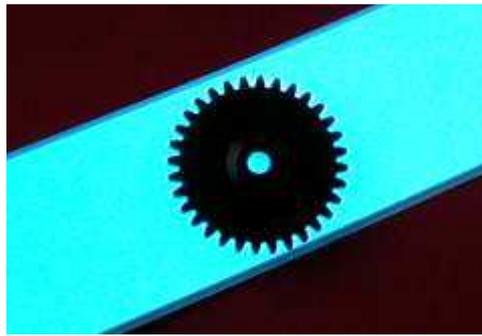


Figura 3.33 – moduli di retroilluminazione

- *illuminatori elettroluminescenti*, a cui si possono dare svariate forme come quelli in Figura 3.34.

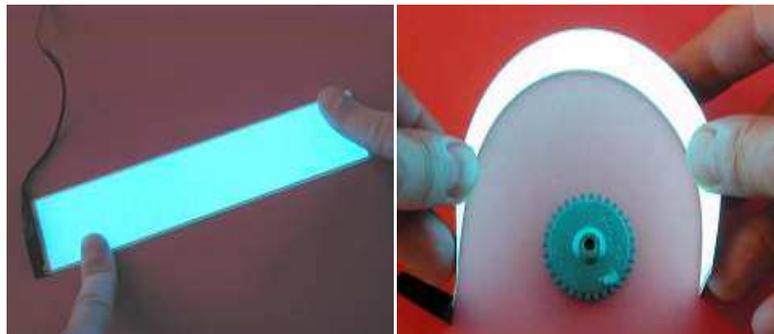


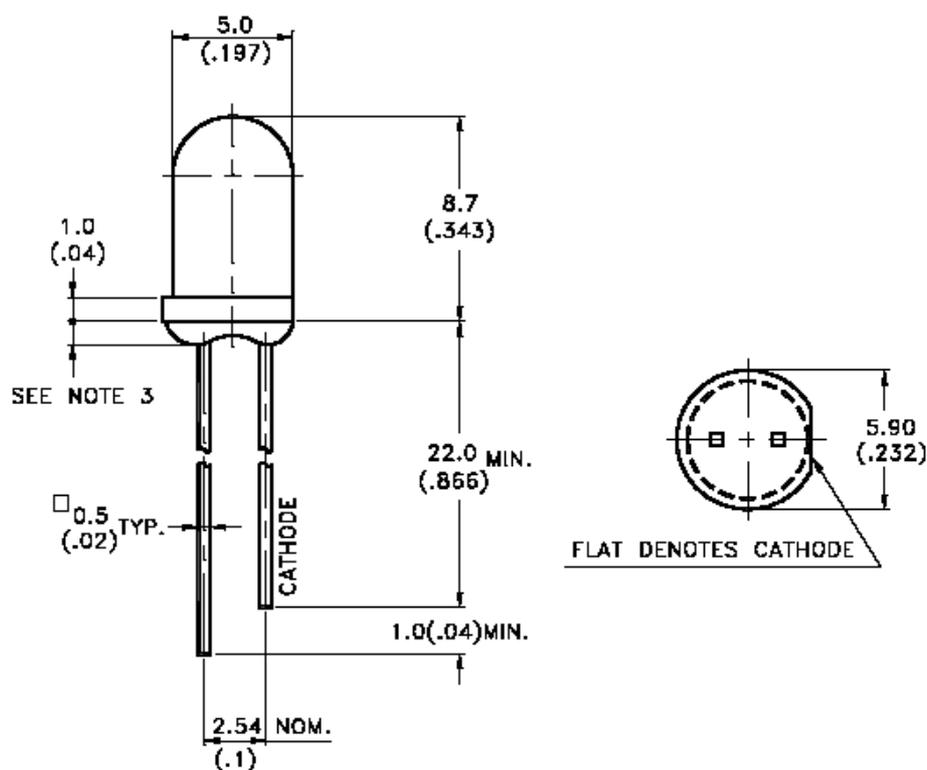
Figura 3.34 – Esempi di illuminatori elettroluminescenti

- *illuminatori campo oscuro* che producono un'illuminazione a basso angolo per delineare alcune irregolarità della superficie del pezzo;
- *illuminatori a luce calda*, a raggi UV che riproducono la luce del sole ed altri ancora.

Dopo una dettagliata analisi di mercato la scelta è ricaduta sui ***moduli di illuminazione ad anello a led***, viste le vantaggiosissime caratteristiche sopra citate dei led.

Per contenere i costi di tale articolo anziché acquistare un prodotto già pronto all'uso si è deciso di realizzarlo interamente secondo la procedura di seguito riportata.

Sono stati utilizzati LED ad alta luminosità della LITE-ON di cui si riportano le più importanti caratteristiche fisiche e tecniche nelle Figure 3.35 e 3.36.



Part No.	Lens Color	Emitted Color
LTW-2S3D7	Water Clear	InGaN White

Figura 3.35 – Caratteristiche fisiche dei led utilizzati per la realizzazione del sistema di illuminazione

Electrical / Optical Characteristics at Ta=25°C

PARAMETER	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	TEST CONDITION
Luminous Intensity	I _v	10000	13000		mcd	I _F = 20mA Note 1,2,3 I _v Spec. Table
Viewing Angle	2 θ _{1/2}		15		deg	Note 4
Chromaticity Coordinates	x		0.30			I _F = 20mA Note 5 Hue Spec. Table & Chromaticity Diagram
	y		0.30			
Forward Voltage	V _F		3.3	3.8	V	I _F = 20mA
Reverse Current	I _R			100	μA	V _R = 5V

Figura 3.36 – Caratteristiche elettriche dei led utilizzati per la realizzazione del sistema di illuminazione

Per la progettazione del circuito stampato si è utilizzato un software dedicato, vale a dire TARGET 3001 Versione 10.

Lo schema elettrico ideato consente di alimentare separatamente ogni singolo anello del sistema di illuminazione.

Conoscendo quindi le caratteristiche elettriche dei led a disposizione, il tipo di circuito da realizzare ed utilizzando un'alimentazione 24V (scegliendo un alimentatore 220V-24V da 0,5A di cui si parlerà in seguito) si è dimensionato il circuito utilizzando resistenze da 390Ω e 0,250W.

Quindi dalla conoscenza del circuito elettrico e con l'ausilio del software TARGET 3001 v.10 si è disegnato il circuito stampato, per la cui realizzazione si è fatto ricorso alla tecnica della fotoincisione.

Il risultato finale, ossia l'illuminatore completo, cui si è pervenuti quindi dopo il posizionamento ed il collegamento dei vari elementi sul circuito stesso è riportato nella Figura 3.37.

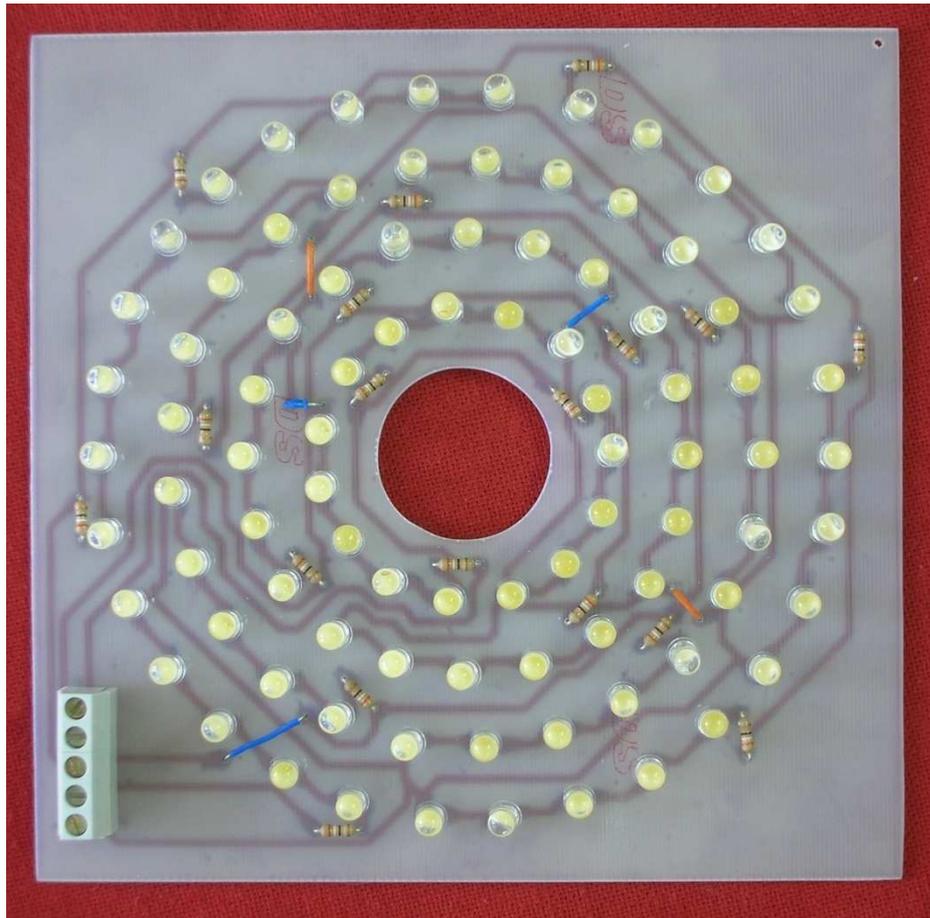


Figura 3.37 – Illuminatore completo

3.3.3 – L'alimentatore del sistema di illuminazione

Per alimentare il sistema di illuminazione descritto in precedenza si è effettuata un'accurata analisi di mercato al termine della quale si è ritenuto

vantaggioso realizzare l'alimentatore costituito da un trasformatore 220V-24V da 0,5mA e trasformando la corrente alternata in corrente continua grazie ad un raddrizzatore a ponte di diodi. Lo schema elettrico dell'alimentatore è quindi riportato nella Figura 3.38.

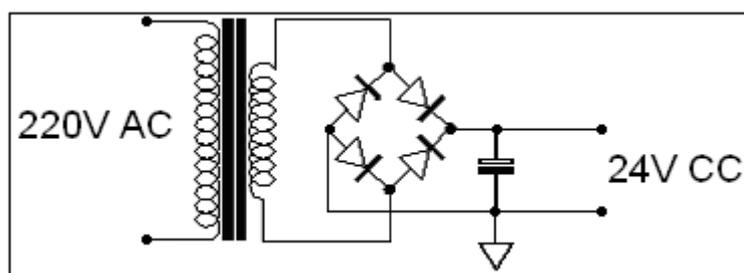


Figura 3.38 – Schema elettrico dell'alimentatore del sistema di illuminazione

Si riporta quindi nelle Figure 3.39 e 3.40 l'alimentatore realizzato la cui uscita è stata provvista di 4 interruttori per poter alimentare separatamente ogni singolo anello del sistema di illuminazione.



Figura 3.39 – Vista laterale dell'alimentatore realizzato per il sistema di illuminazione

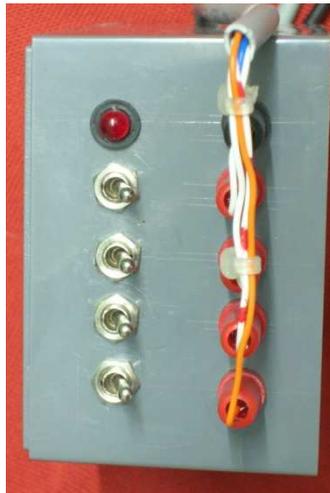


Figura 3.40 - Vista frontale dell'alimentatore realizzato per il sistema di illuminazione

3.3.4 – Posizionamento della videocamera e del sistema di illuminazione

Per effettuare un corretto posizionamento della telecamera e del sistema di illuminazione sono state ipotizzate diverse soluzioni. Infatti il fissaggio può avvenire sia in modo tale da rendere la telecamera ed il sistema di illuminazione solidali alla torcia, oppure in modo tale da renderli solidali al carro motorizzato. Per rendere la soluzione quanto più versatile ed adattabile possibile sono state progettate con l'ausilio del software Autocad una serie di supporti realizzati in acciaio inossidabile come quelle mostrate nella Figura 3.41.



Figura 3.41 – Supporti in acciaio inossidabile utilizzati per il posizionamento della telecamera e del sistema di illuminazione

La progettazione e la realizzazione di tali supporti è stata concepita in modo da poter scegliere, all'occorrenza, il posizionamento della videocamera e dell'illuminatore adattandoli al tipo di ispezione e di operazione da compiere.

È bene mettere in evidenza che comunque si decida di utilizzare il sistema di posizionamento della videocamera e dell'illuminatore è importante che l'inquadratura della videocamera sia sempre soddisfacente per poter analizzare il

giunto, e che la telecamera stessa sia posizionata sempre perpendicolare al piano di lavoro per evitare indesiderati effetti prospettici che potrebbero causare misurazioni falsate dell'area di lavoro.

Per gli utilizzi effettuati in questo lavoro, dopo una lunga serie di prove, si è deciso di posizionare il sistema di visione solidalmente alla torcia.

Nella Figura 3.42 è raffigurato l'intero sistema di visione installato sull'impianto di saldatura GMAW descritta in precedenza.

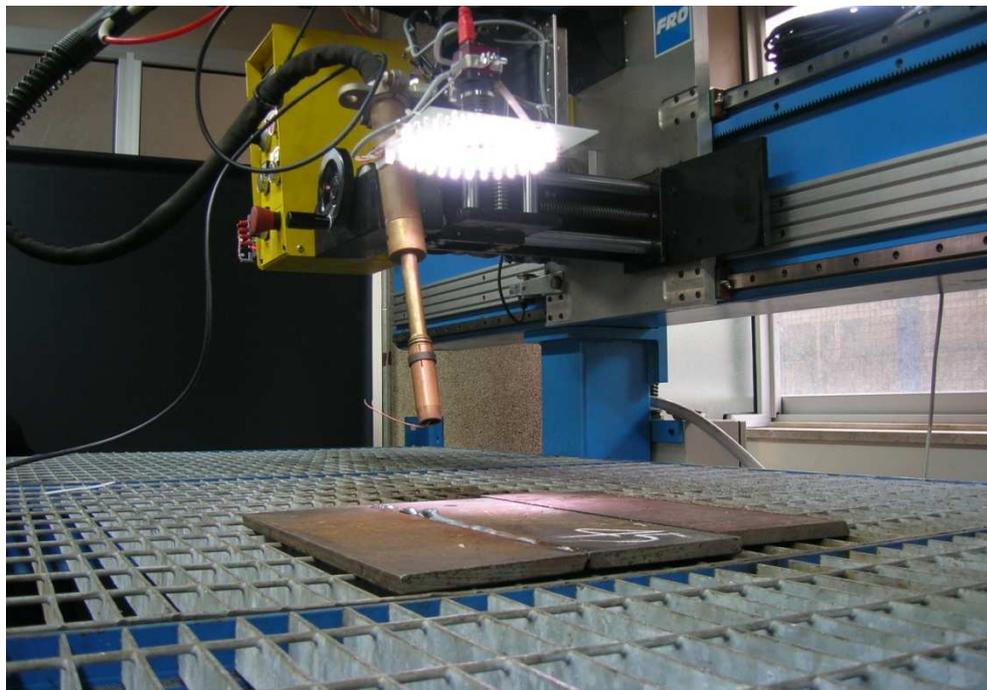


Figura 3.42 – il sistema di visione installato sull'impianto di saldatura GMAW

3.4 – Protezione dai fumi di saldatura

Il sistema di visione, come già detto è composto dalla telecamera e dal sistema di illuminazione anulare a led, entrambi le unità sono molto delicate,

pertanto necessitano di una protezione adeguata sia dai fumi che dagli schizzi di saldatura.

A tal fine si è deciso di utilizzare una cassettera in cui inserire gli elementi del sistema di visione, con l'aggiunta di un vetro di protezione, il tutto sigillato con materiale isolante, in modo da consentire una adeguata protezione come mostrato in figura:

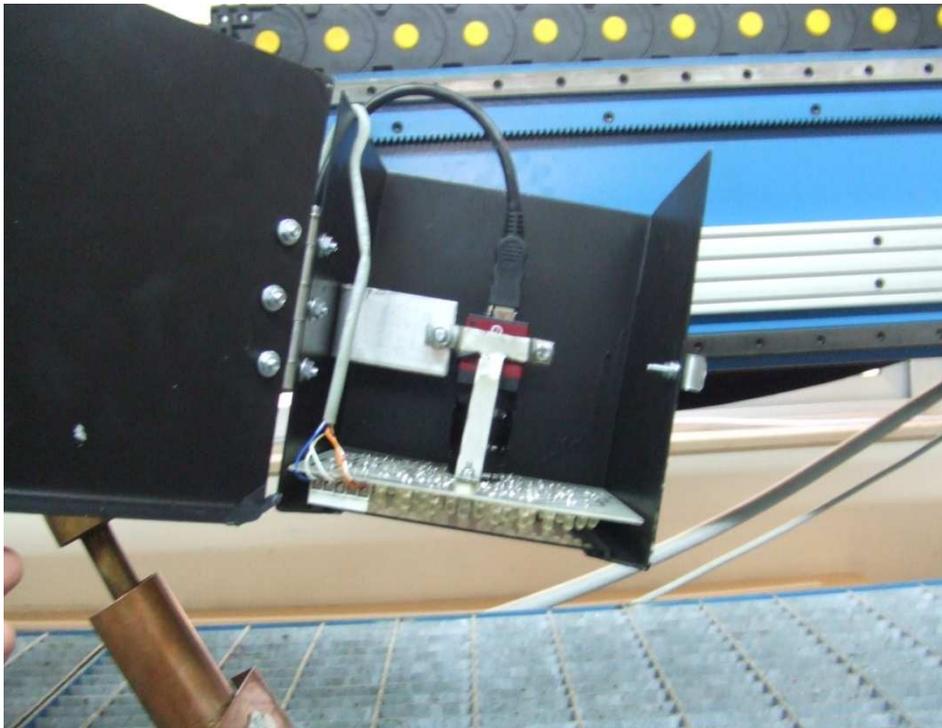


Figura 3.43 – il sistema di visione installato nella cassettera

In figura 3.44 è mostrato nel suo insieme l' impianto di saldatura G.M.A.W.:

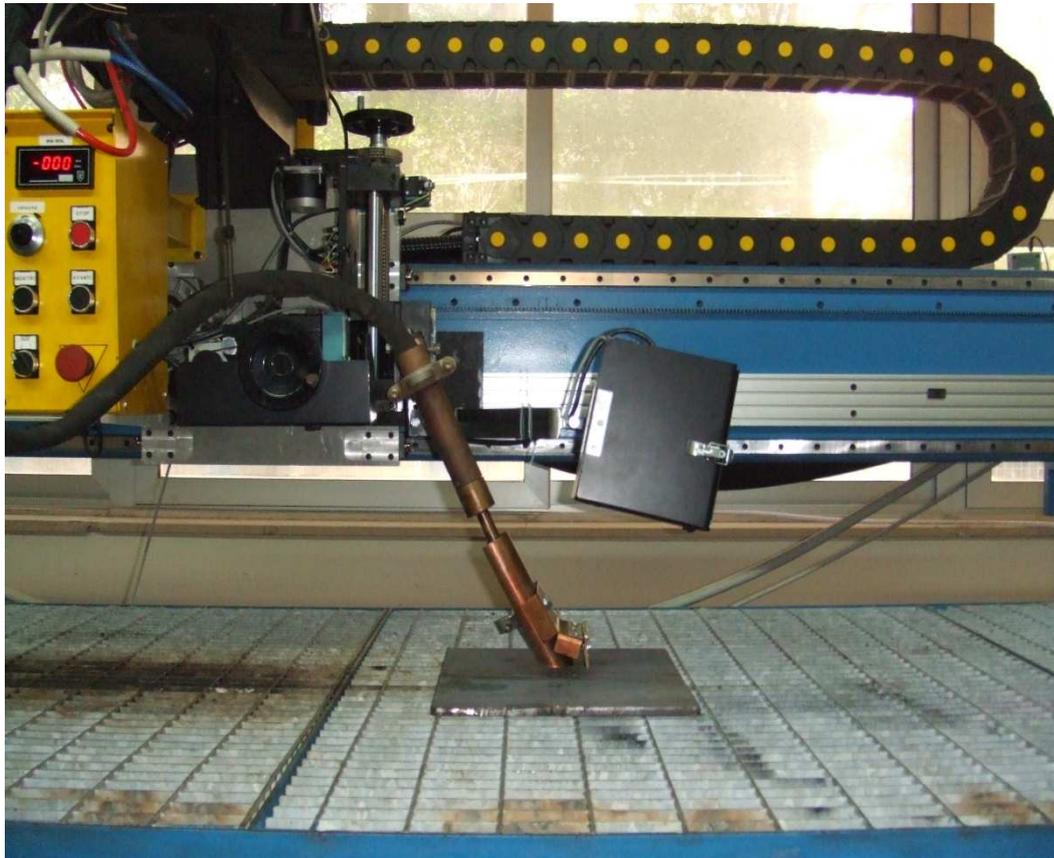


Figura 3.44 – L' impianto di saldatura G.M.A.W.

Si nota inoltre dalla figura la modifica già effettuata alla torcia di saldatura con l'introduzione dello scudo di copertura, ciò sarà discusso in maniera più dettagliata nel capitolo relativo alle prove sperimentali.

4.0 TEORIA DELLA VISIONE ARTIFICIALE

4.1 – Introduzione

L'uso dei sistemi di visione, *SV*, nel mondo industriale risulta ad oggi ancora un'applicazione di nicchia, raramente adottata e praticamente limitata soprattutto ai settori interessati ai controlli di qualità ad alta velocità, in cui tali sistemi risultano nettamente vincenti nel confronto uomo-macchina. Ma le potenzialità degli *SV* vanno ben oltre, lasciando ampio spazio alla creatività dei progettisti per quanto concerne le possibili applicazioni, e possono essere efficacemente affiancati ai processi di foratura, filettatura, tranciatura, piegatura, incollaggio, deposizioni di guarnizioni, rivettature, collegamenti di fili elettrici per crimpaggio, inserzioni, avvitamenti, allineamenti, presenza/assenza di elementi di bloccaggio (spine, anelli elastici, rondelle, ecc.), collegamenti elettrici, pneumatici, marcature, verifica di codici e part number eccetera, fino ad arrivare all'uso accoppiato con i sistemi di manipolazione meccanica (*robot antropomorfi*) dove gli *SV* esprimono la loro massima utilità, riuscendo ad ottimizzare l'uso di queste complesse e costose macchine, eliminando il problema del perfetto posizionamento dei manufatti in lavorazione.

4.2 – Settori di utilizzo dei sistemi di visione

Uno dei settori in cui i sistemi di visione sono maggiormente utilizzati è il *controllo di qualità*, nel quale il controllo visivo è una componente quasi sempre necessaria, sia per monitorare la produzione, isolando particolari o pezzi ritenuti non conformi, sia per monitorare i processi produttivi, evidenziando o

prevenendo malfunzionamenti o modifiche alle tarature degli impianti, sia, infine, per prendere parte all'automazione stessa del processo.

La maggior parte delle macchine automatiche necessita, infatti, di continuo od occasionalmente, di un controllo, che quando possibile, viene svolto visivamente da un operatore, ma che può anche essere svolto con ispezioni automatiche basate su sistemi di visione artificiale, con evidenti vantaggi.

Vanno considerate in effetti due caratteristiche fondamentali dei sistemi di visione artificiale nel paragone uomo-macchina, che sono la velocità e la capacità di analisi, e se l'uomo risulta vincitore in questo ultimo aspetto per la sua intelligenza, dote che non può essere propria di un sistema informatico, un sistema di visione può certamente risultare primo nella gara di velocità. Questo infatti, se sarà programmato per cercare una serie di difetti noti a priori, potrà compiere centinaia di operazioni al secondo, risultando molto efficace, sebbene sia l'unica cosa in grado di fare.

Nel caso in cui si dovesse presentare un problema imprevisto e non valutato inizialmente, tale da pregiudicare la conformità del pezzo, il sistema automatico non lo rilevarebbe, mentre un operatore umano si accorgerebbe subito delle anomalie.

Rimane una domanda: quanto è necessario, vantaggioso, o semplicemente utile, aggiungere la complicazione di un sistema di visione ad una macchina già di per se sufficientemente complessa?

La risposta a tale domanda può essere trovata nella grande flessibilità del sistema di visione e nel suo impatto positivo sui costi di re-tooling (riutilizzazione) di una linea al variare delle caratteristiche di un prodotto. Ed infatti se si devono verificare pochi punti specifici di un manufatto (presenza di un foro, altezza di una vite, una posizione o altro) si potrebbe decidere che l'uso di poche fotocellule a riflessione e di qualche tastatore sia una scelta valida e a

basso costo, e se la macchina nasce o muore per un solo compito, dopo una messa a punto iniziale sul posizionamento e la calibrazione dei sensori, il sistema è essenzialmente completato. Le cose si complicano però se il numero di punti da controllare aumenta, o ancora peggio se la macchina assembla o manipola oggetti diversi. Ben presto si arriva allora alla conclusione che spostare dei *marker software* sull'immagine ripresa dalla videocamera, modificare il valore di alcuni parametri, e aggiungere nuovi punti di misura, agendo solo su mouse e tastiera, è più semplice, più rapido e meno costoso di un intervento di riattrezzaggio della macchina.

Anche in ambito *scientifico* l'utilizzo degli *SV* è sempre più frequente, grazie ai cui studi oggi sono possibili diverse applicazioni di cui si avvantaggia il mondo *militare, bio-medicale, multimediale ed industriale*. Molto interessanti risultano le ricerche relative al settore avveniristico della robotica (*Autonomous Mobile Robot*, in sigla *AMR*), e lo sviluppo di vetture automobilistiche con guida automatica (*Automatic Guided Vehicles*, in sigla *AGVs*), tecnica che mira a diversi obiettivi di guida automatica, come l'esplorazione di una rete stradale, il risparmio di carburante, ed il miglioramento delle condizioni di sicurezza. Nella Figura 1.1 sono riportati degli esempi delle applicazioni dei sistemi di visione nell'ambito della robotica



Figura 4.1 – Esempi di sistemi di visione applicati alla robotica

4.3 – Problematiche relative ai sistemi i visione

La diffusione degli SV ha dovuto misurarsi con alcune difficoltà oggettive: la componentistica del sistema obbliga l'utilizzatore a spaziare dall'ottica, ai sistemi di illuminazione, alle caratteristiche dei vari sensori, all'acquisizione dell'immagine, al software di analisi e di generazione dei risultati, per finire con le tematiche di interfacciamento verso la macchina e, in alcuni casi verso l'operatore. Non è strettamente necessario comprendere a fondo i dettagli matematici di uno specifico algoritmo, o i principi di microelettronica su cui si basa un sensore, ma è comunque necessario avere una cultura sufficiente per un'analisi dettagliata di un problema e per la sua corretta soluzione.

Fino a pochi anni fa il mercato offriva soltanto componenti sciolti o sistemi *chiavi in mano* realizzati ad hoc, ed è soltanto negli ultimi anni che sono stati elaborati sistemi configurabili destinati all'utente finale.

In definitiva, superata la diffidenza iniziale del mondo lavorativo ai cambiamenti, dovuta essenzialmente all'attaccamento ai sistemi di lavorazione

noti, semplici e collaudati, è prevedibile allora che, spinti anche dalla forte concorrenza globale scatenatasi negli ultimi anni, cresca ben presto l'attenzione verso i sistemi di visione artificiale che sono diventati ormai applicazioni semplici, economiche e robuste.

4.4 – L'evoluzione della visione artificiale

Si effettuerà ora una breve analisi dell'evoluzione della visione artificiale attraverso due tipi di approcci: uno teorico, l'altro tecnologico.

4.4.1 L'approccio teorico

L'interesse al mondo della visione e rappresentazione della realtà è un fenomeno da sempre presente nella storia dell'uomo soprattutto in campo pittorico, acquistando un indubbio valore con gli studi sulla rappresentazione prospettica e le relazioni tra luci e ombre compiuti prima dal pittore rinascimentale Leon Battista Alberti nel 1435 e da Leonardo da Vinci poi.

Ma i maggiori passi in avanti in campo scientifico per la comprensione della visione furono fatti nel diciannovesimo secolo, e rilevanti sono stati i lavori svolti da Helmholtz e Wundt, quelli sulla teoria tricromatica del colore dovuta a Yang, Maxwell ed Helmholtz, e lo studio sulla capacità dell'uomo di stimare le profondità grazie alla contemporanea visione realizzata tramite i due occhi, dimostrata da Wheatstone nel 1838. Il problema della corrispondenza tra punti nelle due immagini è stato affrontato invece per la prima volta da Julesz nel 1971.

E' invece all'inizio degli anni cinquanta che l'interesse verso l'elaborazione delle immagini si è indirizzato alla possibilità di interpretazione automatica delle

scene e dopo la seconda guerra mondiale, importante è stato il lavoro svolto da Gibson, che ha mostrato per primo l'importanza del flusso ottico e della tessitura.

La tesi di dottorato al MIT di Roberts nel 1963 è ritenuta la prima nel campo della computer vision. Egli affronta i problemi di base dell'*edge detection* e del *matching* e più generalmente il problema del riconoscimento di oggetti tridimensionali. Al 1964 risale l'utilizzo per la prima volta di tecniche di elaborazione al computer per la correzione di vari tipi di distorsione nelle immagini provenienti da una sonda spaziale.

Horn nel 1970 è stato il primo a studiare le potenzialità dello *shape from shading* (che si analizzerà più avanti), mentre Huffman nel 1971 è stato il primo ad occuparsi di *shape from contour*. E' invece David Marr che ha giocato un ruolo rilevante nel mettere in relazione la visione artificiale e la tradizionale area della visione biologica, ed il suo principale lavoro nel 1982, pubblicato postumo, ha influenzato le successive ricerche sulla ricostruzione tridimensionale di una scena, aprendo un filone di ricerca sulla necessità reale o meno della completa ricostruzione come dimostrò Dickmanns in Germania nel 1987.

Risale invece agli anni novanta l'affermazione dell'idea della visione come di un insieme di processi per estrarre dalle immagini informazioni per manipolare, navigare e riconoscere.

Le prime ricerche sulla percezione visiva avevano il difetto di tendere allo sviluppo di sistemi in cui la percezione veniva considerata quasi come un'aspetto isolato e separato dagli altri, e così le tecniche ed i paradigmi usati per essa miravano alla completa ricostruzione tridimensionale della scena e delle sue proprietà (*percezione generalizzata*), senza preoccuparsi del fatto che questa poteva risultare non necessaria, costituendo così solo un inutile appesantimento

della memoria fisica del sistema informatico ed un eccessivo sovraccarico delle operazioni di calcolo soprattutto nelle elaborazioni in real-time (in sigla *RT*).

Per superare queste difficoltà fu così necessario ricorrere a nuovi paradigmi secondo i quali l'azione e la percezione dovevano essere inseparabili. Questa procedura, adottata in questo lavoro, va sotto il nome di *percezione modulare*, secondo la quale, solo le informazioni strettamente rilevanti e necessarie in un dato istante, perché orientate all'azione, vengono estratte mediante attività percettiva, in modo che alcune delle complicazioni derivanti dalla volontà di ricostruire completamente la scena spariscono del tutto, o quantomeno vengono notevolmente ridotte.

4.4.2 – L'approccio tecnologico

È possibile capire meglio l'evoluzione della tecnologia della visione se la si scinde nelle sue tre operazioni principali:

1. la trasformazione di una scena reale in un segnale elettrico e successivamente in una matrice di numeri (*il sensore*),
2. il trattamento matematico/algoritmico del dato immagine (*il software*),
3. il processamento dei dati (*il processore o computer*).

Il *sensore* nasce con l'invenzione della TV e fa un balzo in avanti con l'arrivo delle videocamere a stato solido (*charged coupled device*, in breve *CCD*). La grandissima diffusione di questa tecnologia nell'immediato dopoguerra imporrà lo standard del video analogico (*PAL* in Europa, *NTSC* negli USA) con l'acquisizione (*PAL*) di 25 immagini al secondo composte ognuna da due campi interlacciati di righe pari e di righe dispari ripresi a 20 millisecondi di distanza.

La *matematica degli algoritmi di visione* è in largo anticipo sulle capacità di calcolo. L'immagine viene suddivisa in una matrice di punti elementari (i *pixel*) ed il valore di intensità di ciascun punto viene confrontato con quello dei suoi pixel vicini. Il mondo accademico inizia a sfornare algoritmi per estrarre informazioni da un'immagine: un bordo, un'area, una forma e così via.

La nascita del *personal computer* all'inizio degli anni '80 ed il passaggio dall'interfaccia alfanumerica all'interfaccia grafica (1984-1985) fornisce la capacità di calcolo a basso costo necessaria alla diffusione della tecnologia della visione. Il personal computer diventa anche la piattaforma di sviluppo per il software applicativo dei sistemi di visione. A partire dalla metà degli anni '90 la visione delle macchine non è più prerogativa di pochi laboratori di ricerca, ma diventa una tecnologia accessibile all'industria ed il cui rapporto costo/prestazioni è in continua e rapida diminuzione.

La visione costituisce quindi il processo percettivo che fornisce un gran numero di informazioni, sia in termini qualitativi che quantitativi: è il processo che estrae informazioni da una scena analizzando l'immagine della stessa.

In genere la scena viene illuminata da una o più sorgenti di luce naturale o artificiale e la telecamera, che è il sensore preposto alla percezione visiva, è dotata di un dispositivo ottico in grado di formare un'immagine della scena su un piano, su cui, la luce riflessa da un punto di un oggetto (non trasparente) ha caratteristiche di luminosità e colore che sono correlati alla luce ricevuta dal sensore e proveniente da una certa direzione.

Per poter essere sottoposta ad elaborazione per mezzo di un computer digitale, l'immagine deve essere *campionata* (o come si suole dire, *discretizzata*), ottenendo una matrice di valori costituenti i pixel, ognuno legato alla luminosità o

al colore in quel punto o alla media in un intorno. Il valore di ogni pixel può essere uno scalare (livello di grigio) o un vettore di n componenti (tipicamente $n=3$), ognuna delle quali legata ad una particolare banda spettrale e tutti insieme atti a caratterizzare l'informazione di colore del pixel.

La scelta di usare una videocamera per il controllo dei parametri di saldatura nella specifica applicazione è dovuta alla sua peculiare caratteristica di essere un sensore di tipo passivo, che permette, quindi, di acquisire informazioni dall'ambiente senza però alterarlo e senza interferire con esso, ma utilizzando l'energia ivi presente (sotto forma di radiazioni luminose) al fine di ottenere informazioni utili per il suo funzionamento.

Nell'applicazione specifica della saldatura, infatti, viste le gravose condizioni di lavoro con generazione di forti campi magnetici, emissione di intense radiazioni luminose, fumi e grande riscaldamento con vistosa deformazione termica, è reso difficile o quantomeno precario l'uso di molti sensori attivi, che tra l'altro hanno anche il difetto, quando sono in tanti ed operano all'interno di uno stesso ambiente strutturato (ambiente con caratteristiche e vincoli noti a priori), di emettere segnali che possono interferire gli uni con gli altri. Tale problema si ingigantisce, poi, in un *ambiente non strutturato*, come spesso si rivela un capannone industriale.

Una videocamera non a contatto diretto con la superficie in lavorazione risulta allora un valido strumento di acquisizione per l'analisi e il controllo del processo di saldatura, attraverso cui è possibile sostituire strumenti elettromeccanici come tastatori, che non potrebbero operare alle temperature di fusione dei metalli, e fotocellule a riflessione o luci laser strutturate, che hanno invece un intervallo di taratura molto ristretto.

Altro fattore che ha indotto alla scelta dell'uso di un sistema di visione è rappresentato dalla possibilità di poter accorpate in un unico strumento funzioni che sono attualmente svolte da altri dispositivi, quali sensori di fine corsa, ed encoder per il rilevamento di posizione e velocità, contribuendo così alla riduzione dei costi, target preposto negli obiettivi del lavoro di tesi. Infatti è stata utilizzata in prima battuta una webcam, sistema di visione molto economico, grazie alla quale si è potuta verificare l'effettiva efficacia nell'utilizzo del sistema di visione senza dover effettuare un investimento importante.

Lo sviluppo futuro del processo di acquisizione immagini dovrà essere reso robusto ed insensibile alle mutevoli condizioni ambientali e di funzionamento, cui il sistema andrà incontro durante la sua attività. Esso dovrà così tollerare:

- I quotidiani cambiamenti della luminosità dalla luce del sole all'ombra;
- La variazione di luminosità dovuta all'accensione dell'arco e gli annerimenti causati dai fumi di saldatura;
- I movimenti inattesi della telecamera a causa di vibrazioni;
- Altre insidie causate ad esempio dalla vicinanza del sistema ad altre macchine saldatrici.

Molti dei citati problemi saranno risolti attraverso lo sviluppo di algoritmi sull'immagine acquisita, con l'uso di filtri montati sull'obiettivo della telecamera e con l'ausilio di illuminatori adeguati.

4.5 – Confronto con il sistema semiautomatico ABW

Attualmente esistono già in commercio tecniche ottimizzate per processi di saldatura in real-time, ma queste sono tutte poco flessibili, complesse (richiedendo così alta specializzazione), e molto costose, non potendo così

riscontrare grande interesse di mercato, se non per le applicazioni specifiche per cui sono state sviluppate.

Si analizzerà ora una tipologia di saldatura con controllo adattativo dei parametri di funzionamento, per avere un termine di paragone su cui lavorare, e mettere in luce i vantaggi della scelta di un sistema di visione artificiale.

4.5.1 – Generalità sul sistema ABW

Si consideri a tale scopo il sistema *ESAB ABW* (*Adaptive Butt Welding*, ossia "saldatura di testa adattativa"), sistema che mira alla risoluzione dei difetti più comuni delle saldature a passate multiple, cioè la fusione incompleta e le inclusioni di scoria, due problemi che sono normalmente gestiti dall'operatore nei procedimenti convenzionali ad arco. Una rappresentazione di questo tipo di saldatura è riportata nella Figura 1.2.



Figura 4.2 – Sistema di saldatura ESAB ABW

Tale sistema viene utilizzato principalmente nelle industrie che producono recipienti in pressione, generatori, valvole a sfera, cilindri per laminatoio, ditte specializzate nella saldatura di acciai resistenti allo scorrimento viscoso, di acciai ad alta resistenza e per basse temperature, produttori di grossi tubi e tubazioni per piattaforme offshore.

L'operatore è messo a dura prova, dovendo compensare la differenza di altezza dei lembi e/o la variazione di volume del giunto ritoccando i parametri di saldatura istantaneamente (in real-time). Ciò richiede quindi l'utilizzo di operatori con grandi attitudini e molta esperienza. E' facile rendersi conto così dei vantaggi derivanti dall'automazione di tale processo di saldatura, automazione ottenuta in questo caso con un programma adattativo di riempimento del giunto realizzato ad hoc.

4.5.2 – Il programma

Il programma controlla indipendentemente tre diversi parametri di riempimento assicurando che il giunto sia riempito a filo dei bordi superiori prima della passata finale. In base a letture continue eseguite da sensori ottici, le sezioni del giunto relative all'area residua da riempire, strato dopo strato, vengono determinate dal calcolatore del sistema *ABW*.

Un sensore ottico intelligente fornisce dei punti di misura rappresentabili graficamente. Questi valori misurati e calcolati gestiscono un *programma adattativo di velocità di saldatura* ed un *programma adattativo di posizionamento della passata*.

L' *ABW* ha come obiettivo quello di offrire alle industrie che eseguono saldature di testa di qualità, una tecnologia di saldatura a passate multiple

automatica al 100% che permetta di fare saldature omogenee e senza difetti anche se la geometria del giunto si scosta dalla sua configurazione teorica.

I vantaggi pubblicizzati da tale tecnica sono costituiti da:

- **Intelligenza operativa:** il sistema gestisce ed è responsabile di tutta l'operazione di riempimento del giunto;
- **Garanzia di qualità:** il sistema verifica automaticamente ogni operazione emettendo un dettagliato resoconto di saldatura;
- **Qualità del giunto e produttività:** il sistema genera saldature senza difetti, di qualità costantemente buona e ripetibile con un fattore di tempo d'arco molto elevato;
- **Comunicazioni:** il sistema con interfaccia ben definito comprendente sofisticati menù già pronti per l'uso, visualizzazione del processo con informazioni grafiche, diagnostiche etc.

Nonostante le grandi potenzialità di tale sistema e la raffinata logica operativa (di esempio anche per il questo lavoro), dalla descrizione del macchinario ci si rende conto di quanto esso sia poco flessibile essendo mirato ad una specifica applicazione, e di come sia possibile con un sistema di visione artificiale condensare in un unico strumento (una smart-camera) i tanti sensori ottici utilizzati, che tra l'altro non sono affatto economici, né tanto meno precisi ed affidabili in ogni occasione, dal momento che questi devono essere posizionati e tarati (range di colore) con una tolleranza strettissima, molto inferiore di quella relativa ad un sistema di visione.

4.5.3 – Programma adattativo della velocità

La velocità di saldatura varia lungo il giunto, entro un dato campo di tolleranza, grazie ad un *programma adattativo della velocità*, che ha il compito di variare il deposito del metallo d'apporto in base alle variazioni di volume del giunto.

Nella Figura 1.3 è mostrato come sono calcolate le sezioni trasversali, i cui rapporti forniscono un riferimento specifico per il calcolo della velocità, che devia lungo tutta la linea di giunzione dal valor medio.

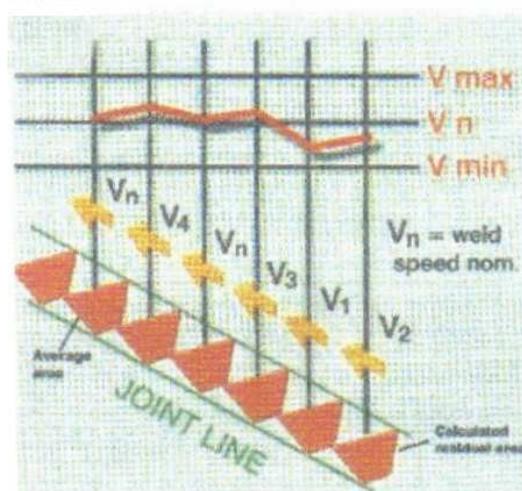


Figura 4.3 – Calcolo delle sezioni trasversali

4.5.4 – Programma adattativo della corrente

C'è poi un *programma adattativo della corrente*, che controlla il livello di corrente, trasversalmente e puntualmente per tutte le sezioni poligonali misurate, ripetendolo per ogni livello di passata lungo tutto il giunto.

Ogni sezione poligonale è suddivisa in sottopoligoni che rappresentano le aree residue della sezione trasversale, per le metà sinistra e destra del giunto, ed il rapporto tra i sotto-poligoni determina la corrente necessaria per depositare il metallo ai due lati della mezzeria del giunto, prevedendo, ad esempio, che la passata esterna da depositare nel sottopoligono riceverà più corrente rispetto alla passata esterna sul lato opposto ad un dato livello del giunto. I cordoni intermedi ricevono una corrente linearmente proporzionale alla corrente di riferimento dei due cordoni esterni.

La Figura 4.5 illustra come l'area residua di una sezione venga suddivisa in sottopoligoni. Il deposito lungo la mezzeria del giunto ha sempre il valore nominale della corrente.

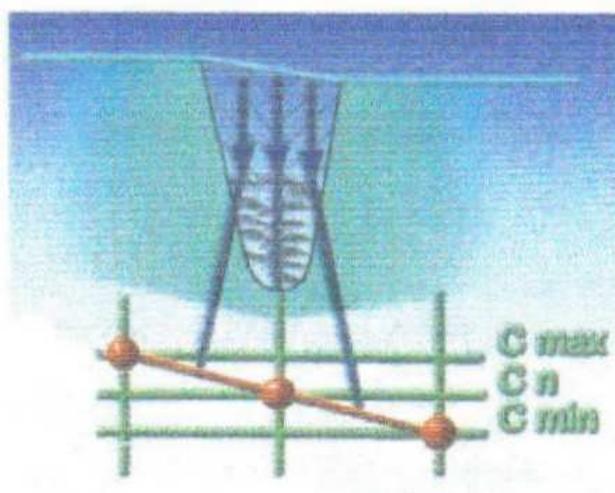


Figura 4.4 – Divisione della sezione in sottopoligoni

4.5.5 – Programma adattativo della posizione delle passate

Infine grazie al *programma adattativo della posizione delle passate* si regola la posizione delle passate intermedie l'una rispetto all'altra e rispetto alla passata

esterna, e se si presenta il caso di lembi ad altezza diversa, il programma sposta la passata intermedia verso il lembo più alto, secondo calcoli ripetuti strato per strato.

4.6 – Visione Computazionale

Spesso si sente parlare in ambito di visione artificiale di *Visione Computazionale (VC)* o *Computer Vision* intendendo con questo termine quel ramo della scienza che si occupa dell'analisi di immagini numeriche al calcolatore, analisi finalizzata a rilevare la presenza di oggetti nella scena e definirne una posizione rispetto ad un riferimento in maniera automatizzata, avendo come unica fonte di informazione l'immagine stessa e la distanza tra il punto di acquisizione e l'oggetto inquadrato.

Va chiarito che la computer vision non tenta di replicare la visione umana e non si occupa ne' di elaborazione di immagini, intendendo il miglioramento, restauro e compressione di immagini, né di riconoscimento di pattern, ossia identificazione e classificazione di caratteristiche nelle immagini.

Quando il mondo reale viene acquisito da un dispositivo meccanico (fotografico), si passa dalla realtà in tre dimensioni ad una sua proiezione bidimensionale; ciò causa la perdita di molte informazioni, tra le quali proprio la possibilità di ricavare la distanza o profondità, degli oggetti raffigurati.

Nella *computer vision* la ricerca della terza dimensione gioca un ruolo fondamentale, infatti oltre a stimare la distanza tra l'osservatore e l'oggetto permette di capire le proprietà tridimensionali e in particolar modo la profondità.

Si usa suddividere la VC in:

- **VC di basso livello**, che si occupa di estrarre determinate proprietà fisiche dell'ambiente visibile come profondità, forma tridimensionale, contorni degli oggetti;
- **VC di alto livello**, che si occupa della estrazione delle proprietà di forma, relazioni spaziali, riconoscimento e classificazione di oggetti (processo di solito applicato ad una porzione dell'immagine).

Va osservato che anche tralasciando i problemi di alto livello legati alla percezione ed al riconoscimento di oggetti, il solo compito di ricostruire la pura struttura geometrica della scena effettuabile operando a basso livello risulta difficile.

Questa operazione può essere efficacemente descritta come l'inverso al calcolatore di una lavorazione grafica, nella quale, dati:

- descrizione geometrica della scena,
- descrizione fotometrica della scena (fonti luminose e proprietà delle superfici),
- descrizione completa dell'apparato di acquisizione (telecamera),

si calcola l'immagine "sintetica" vista dalla telecamera. Si rappresenta schematicamente questo procedimento come in Figura 1.5.



Figura 4.5 – Schema di riferimento per il calcolo dell'immagine “sintetica” vista dalla telecamera

Evidentemente la riduzione geometrica dimensionale operata dalla proiezione dell'immagine sul piano fotosensibile della telecamera e la molteplicità delle cause che concorrono a determinare la fotometria, ossia la luminosità ed il colore, rendono il problema inverso di ricostruzione dall'immagine reale all'immagine ricostruita nel calcolatore, un problema sotto vincolato con soluzione non unica.

4.7 – Approcci alla visione artificiale

Storicamente vi sono tre differenti approcci alla visione artificiale:

- *Approccio gerarchico* ideato da Marr del 1982;
- *Visione attiva* pensata da Bajcsy del 1988;
- *Routines visuali* dovute a Ullman del 1985.

Con riferimento alla distinzione tra percezione generalizzata e percezione modulare (di cui si è parlato precedentemente), l'*approccio gerarchico* può essere

sicuramente visto come appartenente alla prima classe, essendo finalizzato alla completa ricostruzione tridimensionale della scena, invece la *visione attiva* e le *routines visuali* costituiscono due soluzioni modulari, secondo la definizione precedentemente data. La *visione attiva* enfatizza il bisogno delle percezioni piuttosto che quello delle azioni, mentre al contrario, nelle *routines visuali* la percezione costituisce uno strumento necessario per le azioni, tanto da essere denominata action-oriented.

Questi approcci hanno una formulazione che si adatta bene alle logiche informatiche ed infatti l'approccio di Marr è strettamente correlato alle architetture deliberative, laddove la visione attiva può essere legata alle architetture controllistiche, infine le routines visuali risentono molto dell'influenza delle architetture basate sui comportamenti.

Con l'*approccio del ricostruzionismo*, rappresentato dalla teoria sviluppata da Marr alla fine degli anni settanta, si ottiene un primo inquadramento al problema della Visione Computazionale, basato sulla considerazione che un sistema visivo naturale, o artificiale che sia, rappresenta un sistema per il trattamento di una informazione. Ossia sinteticamente, una volta definite le caratteristiche fisiche di base insite nell'ambiente osservato ed assunte le leggi generali del comportamento del sistema osservante, si tratta di individuare un insieme di processi computazionali che consentano di passare da una classe di rappresentazioni pittoriche dell'ambiente ad una sua rappresentazione tridimensionale.

In sintesi, lo scopo della VC nel paradigma ricostruzionista è la produzione di una descrizione del mondo completa ed accurata, impiegante primitive tridimensionali.

Come si è già visto questo non è il solo approccio alla VC. Vi è chi contesta questo modo di porre il problema e sostiene che la descrizione del mondo non debba essere generale, ma dipendente dall'obbiettivo.

E' la *teoria del purposivism* promulgata da Aloimonos nel 1988. Senza entrare nel merito della polemica, si può semplicemente osservare che l'approccio ricostruzionista, per la sua generalità, meglio si presta ad essere oggetto di studio e di ricerca, mentre l'approccio purposivist, proprio per la sua filosofia, essendo problem-driven e quindi finalizzato allo scopo, difficilmente si presta a generalizzazioni ma rappresenterà la soluzione ad-hoc di un particolare problema.

Bisogna comunque osservare che un sistema di visione reale utilizza in genere tutti e tre gli approcci citati.

4.7.1 – L'approccio gerarchico

Nel tentativo di fornire un approccio computazionale alla visione, Marr ed il suo gruppo di ricerca del Laboratorio di Intelligenza Artificiale del M.I.T. hanno considerato la percezione visiva come un problema di elaborazione di informazioni, che ha origine nell'immagine considerata in prima ipotesi come livelli di grigio, e vista come un array di pixel che termina in una descrizione rappresentante una lista di informazioni estratte dall'immagine stessa. Questa era soltanto un'ipotesi iniziale, ed infatti tutto quello che segue resta valido anche se l'immagine che si considera come sorgente di informazione è a colori, con la differenza che ogni pixel viene rappresentato come un vettore in genere di tre elementi.

Nella Figura 1.6 è rappresentata la struttura generale del sistema di visione proposto da Marr.

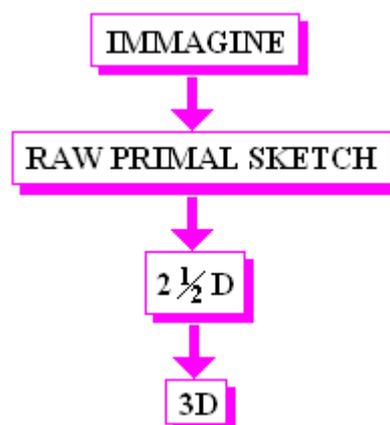


Figura 4.6 – Struttura del sistema di visione di Marr

La prima operazione che viene effettuata è la trasformazione dell'immagine in una descrizione del modo in cui i livelli d'intensità dei colori variano, viene indicata col nome di *raw primal sketch*, e rappresenta l'insieme delle informazioni direttamente estraibili dall'immagine mediante tecniche di elaborazione, come ad esempio l'estrazione dei contorni. Questo livello è denominato *early vision* o *visione di basso livello* ed è riconducibile ad un processo analogo che avviene nell'occhio umano dove l'immagine viene proiettata sulla retina in ogni punto con un'intensità che dipende dalla scena e dalla direzione di osservazione. I fattori principali che influenzano l'intensità sono: l'illuminazione, le proprietà riflesse dell'oggetto che si sta osservando (riflettanza), la forma della parte visibile di superficie di quell'oggetto ed il punto di vista dell'osservatore. Secondo la teoria di Marr, bisogna sfruttare questi fattori per estrarre dall'immagine le informazioni di basso livello che contribuiscono alla formazione del raw primal sketch, operando un'analisi iniziale di tipo locale, finalizzata alla determinazione delle proprietà fisiche locali degli oggetti.

Esistono molte tecniche di elaborazione delle immagini che permettono di estrarre l'informazione di profondità di un punto nell'immagine, ed ognuna di esse costituisce una diversa sorgente di informazioni sulla forma degli oggetti. Spesso alcune tecniche sono più adatte di altre per l'analisi di particolari tipi di oggetti rappresentati nell'immagine e meno adatte per altri, quindi per integrare tutte le informazioni provenienti da diversi canali, è necessario adottare una rappresentazione dell'immagine che permetta la cooperazione tra le diverse tecniche, che viene chiamata $2\frac{1}{2}D$.

Si comincia così ad avere una terza componente, una stima della profondità degli oggetti tipo rilievo. In essa il sistema di riferimento è sempre l'immagine, ma ora si può perseguire l'obiettivo di determinare l'orientazione delle superfici nella scena, e capire quali contorni estratti nel *raw primal sketch* sono relativi a discontinuità reali delle superfici e, quali invece sono mancanti.

Esistono diverse tecniche utili ad estrarre informazioni dalle immagini, divise grosso modo in due categorie che sono:

- *gradiente di luminosità;*
- *visione stereo;*

si possono però usare anche una serie di tecniche miste che le sfruttano entrambe.

I metodi appartenenti alla prima classe vengono denominati *shape from X*, perché permettono di dedurre la forma di una superficie da varie caratteristiche che possono essere estratte dall'immagine ed indicate appunto con la *X*.

Si riporta di seguito una classificazione di queste tecniche con annessa una breve descrizione:

4.7.1.1 – Shape from shading

La tecnica *shape from shading* (forma dalle ombre), ideata da Horn e Pentland a ridosso degli anni novanta, utilizza direttamente il livello di grigio dei pixel per estrarre le informazioni. L'ombreggiatura è infatti un elemento molto importante di una scena, in quanto favorisce la sua interpretazione tridimensionale, determinando la sensazione di profondità.

Questa tecnica parte dall'immagine descritta in termini di livelli di intensità luminosa e utilizza questi ultimi per ricavare una rappresentazione delle superfici presenti sulla stessa scena. Le variazioni di intensità luminosa sono proporzionali all'angolo di orientazione della superficie. Questa metodologia è particolarmente utilizzata quando si deve esaminare la scena analizzandola solo dal punto di vista della luminosità, come nel caso di immagini la cui superficie è completamente priva di elementi pittorici. Di seguito nelle Figure 1.7 e 1.8 sono riportati alcuni esempi di elaborazioni di immagini attraverso la tecnica di *shape from shading*:

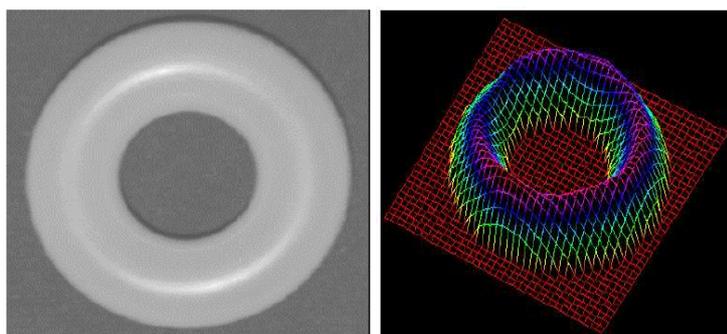


Figura 4.7 – Esempi di immagini elaborate con la tecnica *shape from shading*

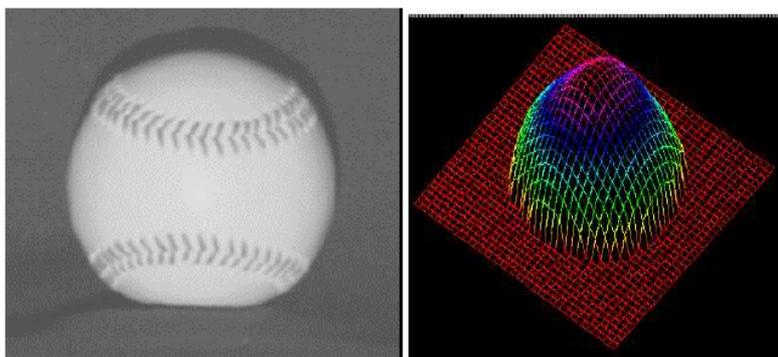


Figura 4.8 - Esempi di immagini elaborate con la tecnica *shape from shading*

4.7.1.2 – Shape from contour

Con la tecnica *shape from contour* (forma dal contorno) la ricostruzione tridimensionale e l'interpretazione di una scena può essere fatta utilizzando semplicemente il disegno “a linee” della stessa scena, senza alcuna informazione pittorica, usando cioè i contorni bidimensionali ottenuti sul piano immagine per proiezione prospettica.

Gli approcci adottati per ricostruire scene tridimensionali da informazioni bidimensionali utilizzano, in modo massiccio, la conoscenza a priori disponibile sulla scena e sono, di conseguenza, quasi simili al processo di interpretazione. E' stata sviluppata una teoria matematica che va sotto il nome di “*inversione prospettica*” per affrontare il problema della ricostruzione tridimensionale.

Un altro approccio è la ricostruzione tramite i contorni “*line drawing*”, ossia da disegni degli spigoli fisici degli oggetti. Limitandosi a scene costituite solo di oggetti con facce piane (il mondo a blocchi), è possibile estrarre informazioni geometriche, in quanto è possibile “etichettare” in modo opportuno le linee in corrispondenza dei tre tipi di contorni tridimensionali: concavi, convessi, di occlusione.

4.7.1.3 – Shape from texture

La *tecnica shape from texture* (forma dalla tessitura) fa uso dell'informazione derivante dalla tessitura delle superfici.

Dal punto di vista concettuale, la ricostruzione tridimensionale basata sulla texture, è analoga alla ricostruzione attraverso i contorni. Per le texture regolari, le metodologie utilizzate per la ricostruzione, si basano sulla considerazione che l'orientamento e la forma della superficie, a cui la texture appartiene, possono essere ricavate analizzando la deformazione geometrica che gli elementi della texture, detti “*texel*”, hanno subito per prospettiva. L'analisi delle texture non regolari è molto più complessa, per questo non è possibile fornire una descrizione in termini geometrici. I texel vengono descritti secondo parametri qualitativi quali il colore, le dimensioni e il valore di intensità luminosa. Le tecniche di ricostruzione, in questo caso, sono basate soprattutto su considerazioni statistiche globali.

4.7.1.4 – Shape from shape

La *tecnica shape from shape* si avvale delle informazioni sui contorni estratte durante la fase di visione di basso livello. Questa tecnica non è però utilizzabile in ambienti non strutturati ossia in luoghi dove l'intensità dell'illuminazione è incontrollabile, ma è invece ideale in ambienti strutturati o in luoghi di lavoro opportunamente ideati, come ad esempio, i banchi di lavoro delle fabbriche opportunamente allestiti, dove lo studio è finalizzato al riconoscimento dei pezzi prodotti.

4.7.1.5 – Shape from motion

La tecnica *shape from motion* (forma dal movimento) considera l'utilizzo di una sequenza di immagini della scena, per estrarre le informazioni sulla base delle quali realizzare l'immagine. Con questo metodo, si utilizza una telecamera che si muove rispetto alla scena inquadrata o viceversa un oggetto che si muove rispetto alla telecamera. Durante il movimento, le proiezioni dei punti della scena sul piano dell'immagine si muovono descrivendo curve che vengono indicate come “*curve di flusso ottico*”. Analizzando queste curve è possibile determinare le distanze dei punti della scena della telecamera. Tali distanze possono essere utilizzate per costruire il modello tridimensionale della scena. Se il movimento è una traslazione lungo l'asse Z, le curve del flusso ottico saranno rette convergenti in un punto, che viene detto “*fuoco di espansione*” o “*fuoco di contrazione*” se il sensore si allontana dalla scena. Facendo fare alla telecamera un movimento traslativo lungo y, durante il quale vengano acquisite una serie di immagini dalla scena, se si conosce il fuoco di espansione del movimento e se tutti i movimenti della telecamera sono noti, è possibile ricostruire la distanza tra i punti della scena e la telecamera stessa.

Questa ultima tecnica si utilizza nella stereovisione di seguito riportata anche se risulta essere meno precisa.

4.7.1.6 – Shape from stereo

La tecnica *shape from stereo* è molto studiata, e riveste grande interesse anche perché è quella che più si avvicina alla visione umana.

Questa tecnica si basa sulla considerazione che, per quanto concerne l'orientazione delle superfici da una singola immagine, il problema resta ancora

indeterminato. Infatti non è possibile ancora determinare l'orientazione senza fare delle assunzioni addizionali, e per questo motivo, in alcuni casi si ricorre alla visione stereo, in cui si hanno a disposizione due o più immagini della scena, acquisite da differenti punti di vista attraverso cui, supposto che si riesca ad ottenere entrambi i punti corrispondenti in entrambe le immagini, è possibile ricorrere a tecniche 3D di triangolarizzazione, determinando così la profondità di ogni punto. Quest'ultimo è il cosiddetto problema del *matching* (delle corrispondenze) che verrà analizzato meglio in seguito.

Si riporta nella Figura 1.9 per chiarezza un esempio di ricostruzione 3D con la tecnica prima citata:

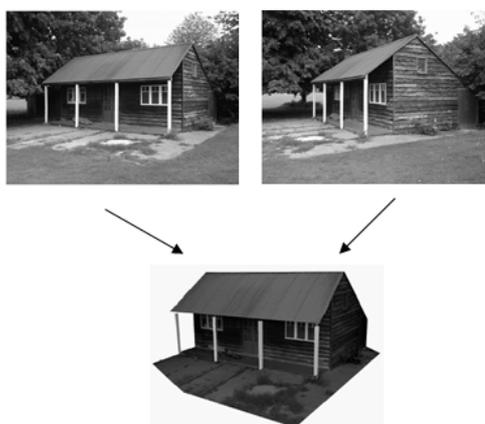


Figura 4.9 – Ricostruzione 3D con la tecnica shape from stereo

Nei primi due stadi del paradigma di visione proposto da Marr, il *raw primal sketch* ed il $2\frac{1}{2}D$, non si fa riferimento alcuno al concetto di regioni o oggetti, elementi propri dell'approccio basato sulla segmentazione (discussa di seguito), ma tutto si sviluppa in funzione delle proprietà delle superfici presenti nell'immagine. L'ultima fase del processo di visione consiste nell'utilizzo delle

informazioni estratte negli stadi precedenti al fine di creare una rappresentazione costituita dalle forme tridimensionali degli oggetti, utile al riconoscimento degli stessi. Dal momento che, in genere, gli oggetti sono visti ogni volta da un'angolazione diversa, la rappresentazione che di essi viene data deve essere tale da garantirne comunque il riconoscimento, diversamente da come accade nel $2 \frac{1}{2} D$, in cui invece la rappresentazione dipende dal punto di vista dell'osservatore. Per ottenere una descrizione della forma che dipenda solo dalla sua struttura, la rappresentazione 3D deve essere fondata sulle caratteristiche geometriche dell'oggetto e le eventuali relazioni tra le parti devono essere relative all'oggetto stesso e per fare ciò, il sistema di riferimento deve essere necessariamente riferito all'oggetto.

4.7.1.7 – Metodo delle immagini intrinseche

Il *metodo delle immagini intrinseche* combina le tecniche shape from X in virtù del fatto che alcune di esse sono migliori di altre in certe situazioni; si effettua allora una media pesata dei valori ottenuti adottando i diversi metodi.

4.7.1.8 – La segmentazione

Un oggetto complesso tridimensionale può essere caratterizzato dalle sue proprietà geometriche: volume, diametro, asse principale o asse di simmetria (se esiste), dalle proprietà di massa: baricentro, inerzie, eccetera; ora, se di tutte le sue caratteristiche se ne considerano solo tre (tre *features*): centro di massa, dimensione totale ed assi, nonostante l'oggetto non possa essere descritto e poi riconosciuto solo sulla base di queste tre caratteristiche, se lo si pensa costituito da un certo numero di parti elementari ognuna delle quali descrivibile dalle

suddette tre features, si ottiene un modello, chiamato *modello 3D*, che permette di trattare le varie parti costituenti la forma, come parti esse stesse, senza porre alcuna limitazione al livello di dettaglio raggiungibile, realizzando così una gerarchia di forme elementari.

4.7.3 – La visione attiva

L'attività percettiva degli esseri viventi è legata non soltanto ad un'elaborazione delle informazioni acquisite dall'ambiente che li circonda in maniera passiva, ma piuttosto ad un'attività di esplorazione e di ricerca dello stesso. Per esempio, negli uomini, durante il processo visivo, la pupilla, al centro dell'iride, si apre e si chiude in relazione alla quantità di luce presente nella scena. Inoltre, l'occhio mette a fuoco gli oggetti in base alla loro distanza, ed anche i movimenti della testa e dell'intero corpo sono influenzati dall'attività percettiva, nel tentativo di trovare una migliore posizione finalizzata al miglioramento dell'attività visiva.

Il paradigma della percezione attiva, ed in particolare della visione attiva, trae origine proprio dal meccanismo percettivo degli esseri viventi, si tratta di controllare il processo di acquisizione dei dati provenienti dai sensori, ed interpretarli in funzione dell'obiettivo che si deve perseguire. Ma non necessariamente un sistema di percezione attiva deve fare uso di sensori attivi; infatti, anche l'impiego dei sensori passivi può servire a produrre un sistema di percezione attiva quando questi sono usati opportunamente. Bisogna considerare che negli approcci convenzionali, l'acquisizione dell'immagine è considerata come la base da cui parte l'attività percettiva, mentre nella teoria della percezione attiva, l'acquisizione viene inserita all'interno del processo di visione valendo il principio che essendo limitato il contenuto informativo estraibile da una singola

immagine della scena, è più produttivo cercare di avere i migliori dati sensoriali, piuttosto che cercare di estrarre quante più informazioni possibili da quelli che si hanno a disposizione. Queste considerazioni sulla percezione attiva in generale possono essere estese in maniera specifica alla visione attiva.

Un sistema di visione attiva è capace di gestire i parametri visuali in maniera controllata allo scopo di estrarre dati utili dall'immagine della scena. La visione attiva, pertanto, può essere definita come un processo intelligente di acquisizione di dati visivi e di elaborazione degli stessi al fine di ottenere l'interpretazione della scena, l'intelligenza del sistema di gestione e controllo è espressa nel controllo della telecamera attraverso un insieme di feedback ed una conoscenza a priori del mondo (ambiente strutturato).

A questo punto si può prendere spunto dal lavoro di Bajcsy, che pone l'enfasi piuttosto che sull'aspetto scientifico della visione attiva, sullo studio di modelli e strategie di controllo finalizzate alla percezione, modellizzando i sensori, gli oggetti, l'ambiente e le loro interazioni, allo scopo di raggiungere un obiettivo, che può essere il riconoscimento, la navigazione automatica, l'azionamento di automatismi ed altro. Bajcsy suggerisce un modello generale per un sistema multistrato di visione attiva per il riconoscimento di forme tridimensionali, in cui si possono distinguere alcune fasi di seguito elencate dal livello più basso a quello più alto:

- controllo del dispositivo fisico, con l'obiettivo di ottenere una prima immagine della scena con un'adeguata messa a fuoco;
- controllo dei moduli di visione di basso livello, ottenendo una segmentazione 2D;
- controllo del sistema binoculare (hardware e software), al fine di acquisire informazioni sulla profondità ed ottenerne una mappa;

- controllo della mappa di profondità, finalizzata all'estrazione di parti di superfici;
- riconoscimento degli oggetti;
- interpretazione della scena.

L'assunzione di base della visione attiva e del suddetto modello è l'inclusione di feedback che collegano i vari stadi del sistema, per lo scambio tra loro dei dati necessari. Si è scelto di non riproporre in dettaglio lo schema proposto da Bajcsy, in quanto (come la stessa autrice sostiene), non è l'unico possibile ed inoltre l'ordine con cui le operazioni vengono eseguite in un certo momento può essere diverso da quello presentato, essendo possibile una variazione nel flusso dei dati lungo l'intero processo, a causa dei feedback.

Ottimi esempi di applicazione del citato paradigma sono stati compiuti dai ricercatori Wilkes e Tsotsos nel 1994 all'università di Toronto, essi hanno creato alcuni programmi per il controllo della telecamera in un task di riconoscimento di oggetti, in particolare per operare una rotazione in maniera da orientarsi verticalmente rispetto all'oggetto, per traslare parallelamente al piano dell'immagine al fine di inseguire qualche oggetto o qualche caratteristica e, in ultimo, per effettuare operazioni di zoom, sperimentando il sistema in scene complesse e in presenza di occlusioni degli oggetti.

La possibilità di avere più punti di vista con un meccanismo guidato dai feedback permette di ridurre la complessità computazionale del task di riconoscimento, per esempio la rotazione della telecamera semplifica l'operazione di matching tra gli oggetti ed i modelli che si hanno a disposizione, essendo invariante rispetto alla rotazione stessa. La visione attiva è stata trattata in molti altri lavori, tra cui Aloimonos nel 1993, di cui si segnala solo la singolare affermazione che un problema di visione mal posto, non lineare e instabile per un osservatore passivo diventa ben posto, lineare e stabile per un osservatore attivo.

4.7.4 – Routines visuali

Le *routines visuali* si collocano nella classe degli approcci di percezione modulare e costituiscono lo schema di visione più flessibile tra quelli mostrati.

Secondo la teoria di Ullman, teoria alla base dello sviluppo di molteplici approcci alle problematiche relative ai sistemi di visione artificiale, un sistema di visione artificiale deve essere costituito da un insieme di routines, ognuna delle quali implementa operazioni elementari, finalizzate al compimento di un determinato e specifico task percettivo. Inoltre le varie routines possono condividere alcune operazioni elementari tra di loro e ognuna di esse può anche agire soltanto su una parte dell'immagine; esse possono essere organizzate in parallelo o in serie tra loro ma in genere si ha una configurazione mista, che prevede una catena sequenziale in cui ad ogni step possono agire contemporaneamente ed in parallelo più routines.

Nella teoria di Ullman è presente un insieme di *routines universali* che forniscono le informazioni iniziali sull'immagine e che costituiscono la base di partenza e una sorgente di informazioni per le routines più specifiche e legate al particolare task di visione.

4.8 – Tecniche di analisi delle immagini

I paradigmi di visione artificiale, presentati precedentemente, utilizzano nelle varie fasi alcune tecniche di elaborazione ed analisi delle immagini che possono essere suddivise in tre principali aree:

- Elaborazioni di basso livello (*low-level processing*);
- Elaborazioni di medio livello (*intermediate-level processing*);

- Elaborazioni di alto livello (*high-level processing*).

In genere i confini fra le suddette categorie non sono ben definiti, come mostrato nella figura seguente dalle zone delimitate in tratteggio e sovrapposte:

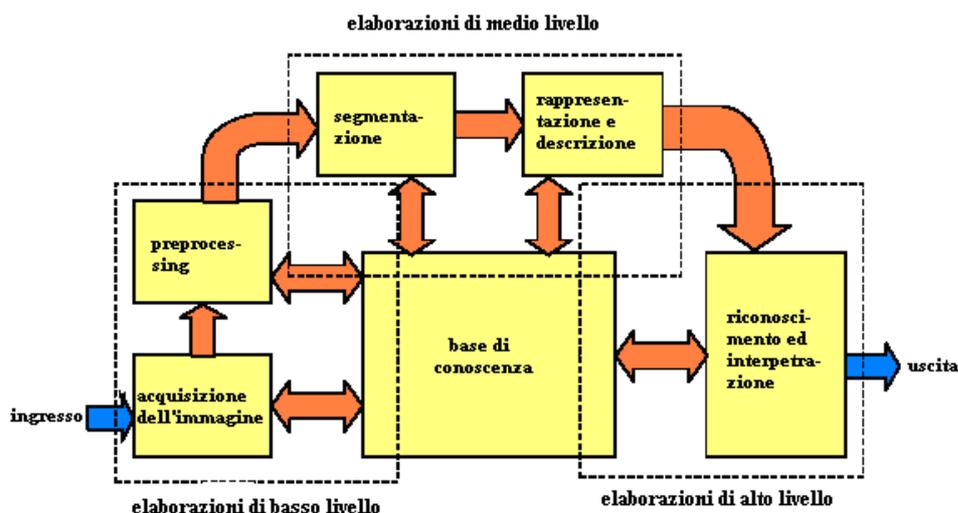


Figura 4.10 – Elaborazioni di basso, medio, ed alto livello

Per esempio, i metodi di thresholding (ricerca dei margini dell'oggetto) possono essere considerati come operazioni di preprocessing, e quindi di basso livello, ma anche di segmentazione, e quindi di livello intermedio, a seconda del tipo dell' applicazione in cui vengono usati.

Questo schema è molto generale e corrisponde al paradigma di Marr, almeno nella parte relativa al *primal sketch* e nella realizzazione del $2\frac{1}{2}D$. Sembra, tuttavia, che l'approccio gerarchico si orienti anche nelle fasi preliminari verso la ricostruzione completa della scena. Il suddetto modello può però anche essere visto come una struttura del tutto generale di una routine visuale.

Si può affermare che il sistema opera a diversi livelli di astrazione che sono:

- singoli pixel;
- regioni elementari (parti di oggetto);
- regioni complesse (oggetti);
- intera immagine.

Il modulo di elaborazione a basso livello agisce sui pixel, mentre il modulo intermedio caratterizza regioni elementari e complesse; infine l'ultima fase esegue la comprensione dell'intera immagine, a partire dalle caratteristiche delle regioni estratte durante lo stadio precedente. Nello schema precedente, il blocco indicato come *base di conoscenza* costituisce qualsiasi rappresentazione codificata in una qualche maniera della conoscenza preconstituita di cui è dotato il sistema di analisi delle immagini, generalmente si tratta di una conoscenza generale, unita alle competenze specifiche sul problema particolare e sull'ambiente di lavoro.

Il livello di dettaglio della conoscenza dipende soprattutto dalle finalità dell'applicazione e dagli obiettivi da perseguire. Le doppie frecce tra tutti i moduli e la base di conoscenza indicano un interscambio di informazioni a doppio senso, anche se non espressamente indicato, attraverso l'interazione dei singoli blocchi con la base di conoscenza, si realizza una sorta di feedback tra le fasi più avanzate e quelle preliminari, a testimonianza della completa generalità del modello stesso.

4.8.1 – Tecniche di elaborazione di basso livello

Le *tecniche di elaborazione di basso livello* non richiedono alcun grado di intelligenza al sistema di analisi, essendo operazioni automatiche, come l'acquisizione dell'immagine e la riduzione del rumore, e volendo fare un parallelo col sistema visivo umano, queste si possono paragonare alle operazioni compiute dall'occhio per mettere a fuoco l'immagine o per adeguare l'apertura della pupilla

alla quantità di luce presente nella scena. Possono pertanto essere considerate come dei riflessi, delle reazioni automatiche.

4.8.2 – Tecniche di elaborazione di medio livello

Le *tecniche di elaborazione di medio livello* mirano all'estrazione e alla caratterizzazione delle componenti fondamentali dell'immagine, attraverso processi di *segmentazione* e successivamente di *rappresentazione e descrizione delle caratteristiche estratte*. In taluni casi necessitano di un certo grado di intelligenza, per ottenere in maniera più sofisticata alcuni risultati, altrimenti non raggiungibili.

4.8.3 – Tecniche di elaborazione di alto livello

Le *tecniche di alto livello* infine, riguardano i metodi di riconoscimento degli oggetti e di interpretazione della scena.

Diversamente dalle tecniche appartenenti alle precedenti due classi, le quali generalmente si fondano su teorie ben solide, le tecniche di riconoscimento ed interpretazione sono fortemente dipendenti dall'applicazione e le loro basi teoriche, di conseguenza, sono meno fondate.

Si percepisce come le tecniche esposte imitano spesso nelle logiche elaborative i processi già utilizzati dai sistemi biologici, dove nel caso specifico c'è l'occhio che raccoglie una banda di radiazioni elettromagnetiche rimbalzate su diverse superfici e provenienti da fonti luminose diverse, ed il cervello che elabora questa informazione formando il quadro della scena come l'uomo la percepisce.

4.9 – La visione umana

La *visione umana* percepisce il mondo tridimensionale (3D) come immagine retinica nei nostri occhi attraverso un processo chiamato proiezione. Il sistema visivo umano sfrutta molteplici indizi visivi per recuperare la profondità delle superfici della scena, informazione che viene persa nel processo di proiezione dell'immagine sulla retina che è un processo puramente bidimensionale. Alcuni esempi di questi indizi includono la parallasse binoculare, la parallasse monoculare da moto, lo sfocamento, le tessiture, le sfumature, le ombre e così via, indizi visivi che vengono usati almeno in parte anche per la visione artificiale al fine di progettare algoritmi per emulare il modo in cui i nostri occhi percepiscono la profondità.

4.9.1 – Parallasse binoculare

La *parallasse binoculare* è il più importante indizio visivo di profondità nel sistema di visione umano, questa fa riferimento alle immagini lievemente diverse osservate dall'occhio destro rispetto a quello sinistro dovute alla loro distanza, immagini che successivamente vengono ricombinate nel cervello permettendo così di ricostruire una fedele descrizione del mondo tridimensionale osservato.

4.9.2 – Parallasse monoculare da moto

La *parallasse monoculare da moto* consente invece la valutazione delle distanze grazie all'acquisizione non contemporanea di differenti viste della scena attraverso semplici spostamenti del punto di vista.

4.10 – Analogie tra la visione artificiale e la visione umana

Per ottenere una ricostruzione quanto più accurata possibile della scena, cosa che potrebbe rilevarsi utile qualora si fosse interessati, per esempio, a rilevare le deformazioni delle lamiere causate dall'elevato apporto termico dovuto alla saldatura, è possibile utilizzare diverse tecniche che si avvicinano molto a quello che è il funzionamento dell'occhio umano.

Ebbene volendo usare ad esempio una sola telecamera, si può immaginare allora di operare in modo simile al sistema visuale biologico sfruttando la parallasse monoculare da moto, fondendo insieme immagini lievemente diverse riprese da posizioni lievemente diverse, altrimenti dovremmo ricorrere alla visione stereo (*stereo vision*) che adotta invece due telecamere e che si rifà quindi ai processi di ricostruzione relativi alla parallasse binoculare.

In linea di principio però la tipologia delle informazioni estratte deve dipendere dall'applicazione e dalle sue finalità ed esigenze, e quando è possibile, si evita di effettuare una ricostruzione tridimensionale della scena, cercando invece di estrarre solo le informazioni utili per compiere le azioni finalizzate allo scopo, in accordo a quanto espresso dai nuovi paradigmi percettivi già citati.

5.0 ANALISI DELL'IMMAGINE

5.1 – Introduzione

E' necessario, a questo punto, procedere all'analisi dei meccanismi di *formazione dell'immagine* di un apparato di acquisizione effettuando l'approssimazione di comportamento della *lente sottile*, esaminando i pilastri della *fotometria* e della *riflessione speculare* che rappresentano le basi teoriche per la successiva fase di analisi degli algoritmi di manipolazione dell'immagine.

5.2 – La formazione dell'immagine

Un apparato di acquisizione di immagini funziona raccogliendo la luce riflessa dagli oggetti della scena e creando una immagine bidimensionale. Quindi volendo utilizzare l'immagine per ottenere informazioni sulla scena, bisogna studiare bene la natura di questo processo che si vorrà poi poter invertire.

Il modello geometrico più semplice da considerare per trattare la formazione dell'immagine è la *pinhole camera* (letteralmente: macchina fotografica a foro di spillo) di cui si riporta nella Figura 2.1 una rappresentazione:

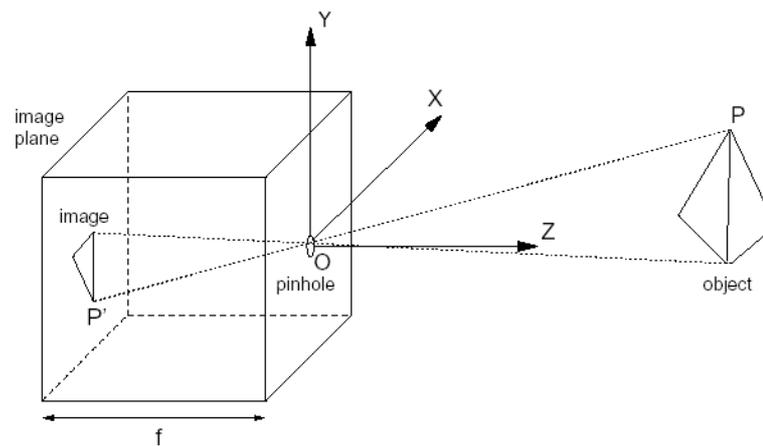


Figura 5.1 – Geometria della formazione dell'immagine nella *pinhole camera*.

Sia P un punto della scena, di coordinate $(X;Y;Z)$ e sia P' la sua proiezione sul piano immagine (o retina), di coordinate $(X';Y';Z')$. Se f è la distanza del foro O (centro di proiezione) dal piano immagine (distanza focale), allora per i principi di similitudine dei triangoli si ottiene:

$$\frac{-X'}{f} = \frac{X}{Z} \quad e \quad \frac{-Y'}{f} = \frac{Y}{Z} \quad (2-1)$$

e quindi:

$$X' = \frac{-fX}{Z} \quad ; \quad Y' = \frac{-fY}{Z} \quad ; \quad Z' = f \quad (2-2)$$

Queste equazioni definiscono il processo di formazione dell'immagine che prende il nome di *proiezione prospettica*. Si noti che l'immagine è invertita rispetto alla scena sia “destra-sinistra” che “sopra-sotto”, come indicato dal segno meno. Questo accorgimento fu per la prima volta raccomandato dal pittore rinascimentale Leon Battista Alberti nel 1435, quale metodo per ottenere un disegno accurato di una scena tridimensionale.

Per capire bene i concetti di proiezione prospettica o non prospettica, detta *ortografica*, si faccia riferimento alle Figure 2.2 e 2.3.

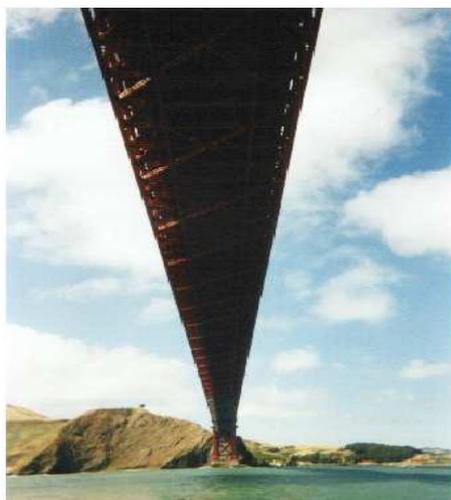


Figura 5.2 – Esempio di immagine
PROSPETTICA



Figura 5.3 – Esempio di immagine
ORTOGRAFICA

La Figura 2.2 mostra un'immagine decisamente prospettica (si notino le linee convergenti) mentre la Figura 2.3 mostra un'immagine decisamente ortografica (la distanza dall'oggetto è molto grande rispetto alla sua profondità). Se l'oggetto inquadrato è relativamente sottile, confrontato con la sua distanza media dalla telecamera, si può approssimare la proiezione prospettica con la proiezione ortografica (*weak perspective*).

L'idea è la seguente: se la profondità Z dei punti dell'oggetto varia in un intervallo $Z_0 \pm \Delta Z$, con $\Delta Z/Z_0 \ll 1$, allora il *fattore di scala prospettico* f/Z può essere approssimato da una costante f/Z_0 .

Anche questo risultato era noto nel Rinascimento, ed infatti Leonardo da Vinci raccomandava di usare questa approssimazione quando $\Delta Z/Z_0 < 1/10$.

Le equazioni di proiezione diventano allora:

$$X' = \frac{-f}{Z_0} X \quad ; \quad Y' = \frac{-f}{Z_0} Y \quad (2-3)$$

Si tratta di una proiezione ortografica ottenuta con una scalatura di un fattore f/Z_0 .

5.3 – Le lenti sottili

Gli occhi dei vertebrati, le macchine fotografiche e le telecamere usano lenti, che, essendo più grandi di un foro di spillo, riescono a raccogliere più luce. C'è però il rovescio della medaglia: non tutta la scena può essere messa a fuoco nello stesso tempo. L'approssimazione fatta per l'ottica del sistema di acquisizione (che in genere è molto complessa, essendo costituita da più lenti) è quella della lente sottile.

Le lenti sottili godono delle seguenti proprietà:

- I raggi paralleli all'asse ottico incidenti sulla lente vengono rifratti in modo da passare per un punto dell'asse ottico chiamato *fuoco* F ;
- I raggi che passano per il *centro* C della lente sono inalterati.

Per chiarezza si rimanda alla Figura 2.4

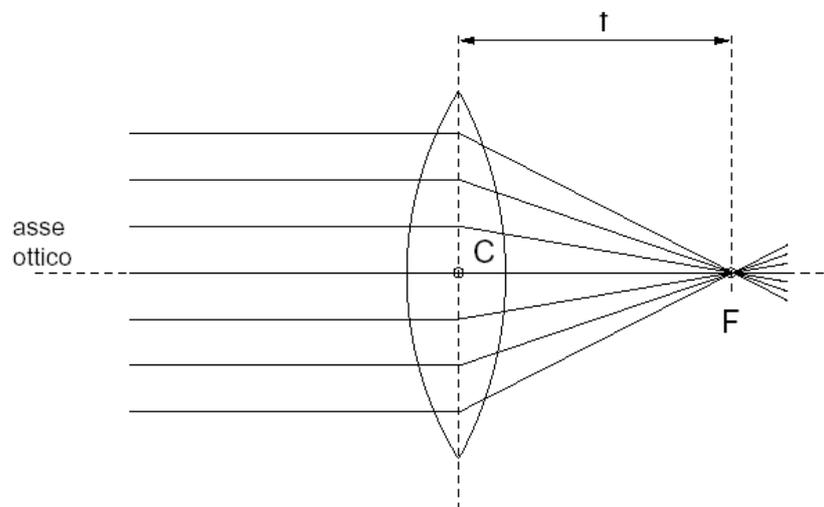


Figura 5.4 – Lente sottile

La distanza del fuoco F dal centro della lente C prende il nome di *distanza focale f*. Essa dipende dai raggi di curvatura delle superfici della lente e dall'indice di rifrazione del materiale costituente.

Dato un punto della scena P è possibile costruirne graficamente l'immagine P_0 (o *punto coniugato*) servendoci di due raggi particolari che partono da P: il raggio parallelo all'asse ottico, che dopo la rifrazione passa per F ed il raggio che passa inalterato per C. Grazie a questa costruzione ed alla similarità dei triangoli, si ottiene la formula dei punti coniugati (o **equazione della lente sottile**):

$$\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z'} = \frac{1}{f} \quad (2-4)$$

Si faccia riferimento alla Figura 2.5 mostrata di seguito

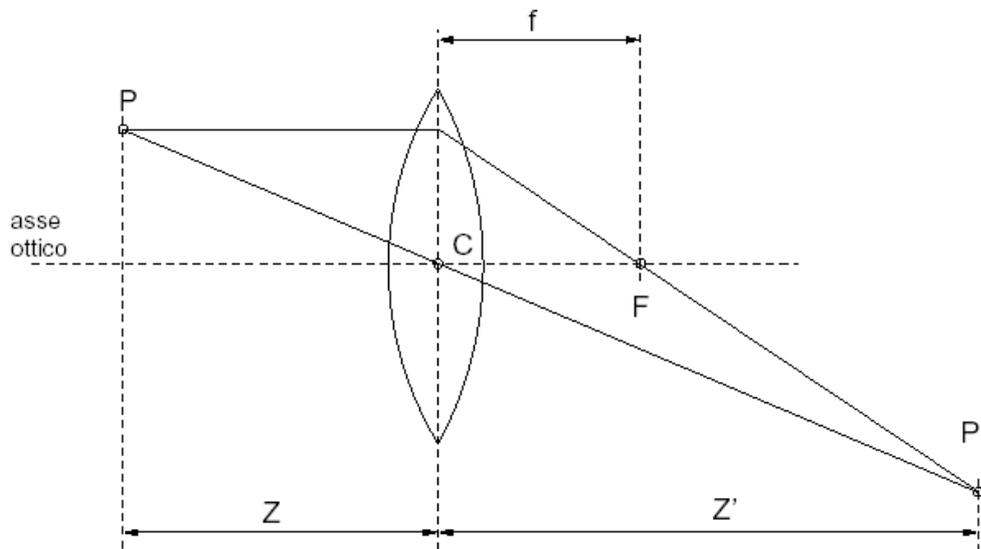


Figura 5.5 – Costruzione dell'immagine di un punto

L'immagine di un punto della scena distante Z dalla lente, viene prodotta (messa a fuoco) ad una distanza dalla lente Z_0 , che dipende dalla distanza Z del punto e dalla focale f della lente. Sostituendo Z o Z_0 si ottiene l'immagine sfocata del punto, ovvero un cerchio, che prende il nome di *cerchio di confusione*, e considerato che il piano immagine è coperto da elementi fotosensibili che hanno una dimensione piccola ma finita, finché il cerchio di confusione non supera le dimensioni dell'elemento fotosensibile, l'immagine risulta a fuoco. Dunque, esiste un intervallo di profondità per il quale i punti sono a fuoco, che prende il nome di *profondità di campo*. Si capisce che per mettere a fuoco oggetti a distanze diverse, le lenti delle telecamere devono traslare nella direzione Z , mentre le lenti dell'occhio, più evolute, cambiano forma (focale).

5.4 – La fotometria

La luminosità $I(p)$ di un pixel p nell'immagine è proporzionale alla quantità di luce che la superficie S_p riflette verso la telecamera (S_p è la superficie che si proietta nel pixel p). Questa, a sua volta, dipende dal modo in cui la superficie S_p riflette la luce e dalla posizione, tipo e distribuzione delle sorgenti luminose. Si definisce *radianza* (irradianza) di una superficie la potenza per unità di area della radiazione emessa (ricevuta), mentre è detta *riflettanza* la proprietà di una superficie che descrive il modo in cui essa riflette la luce incidente. Si può caratterizzare la riflettanza di una superficie come rapporto tra radianza emessa (L) e radianza incidente (E), mediante la *BRDF* (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*):

$$BRDF(\theta_i, \phi_i, \theta_e, \phi_e) = \frac{L(\theta_i, \phi_i)}{E(\theta_e, \phi_e)} \quad (2-5)$$

In un modello semplificato della fotometria del sensore, si assumerà che la radiazione che lascia la superficie S_p coincide con la radiazione che raggiunge il pixel p , dunque la sua luminosità (*brightness*) $I(p)$ vale:

$$I(p) = L(S_p) \quad (2-6)$$

Per i simboli si faccia riferimento alla Figura 2.6.

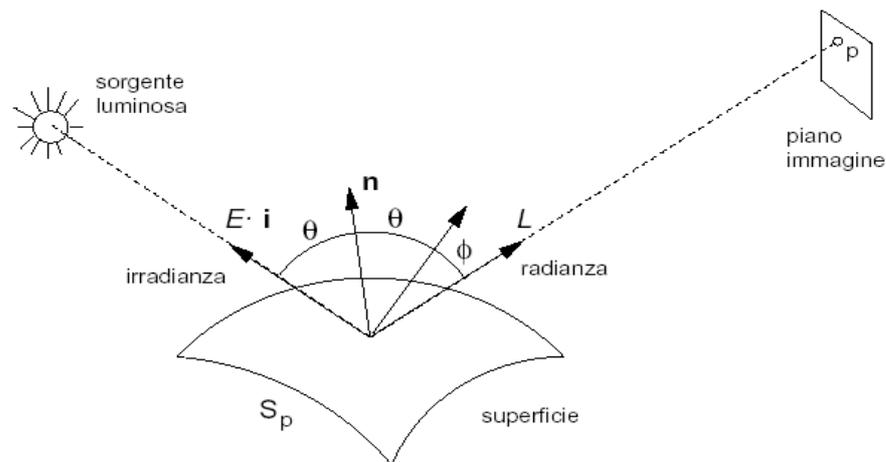


Figura 5.6 – Fotometria della formazione dell'immagine

La luce diffusa penetra sotto la superficie dell'oggetto, viene assorbita e riemessa, la superficie appare ugualmente luminosa da ogni direzione, e la *BRDF* per una tale superficie ha una forma molto semplice, infatti la radianza L di un perfetto diffusore segue la cosiddetta *legge di Lambert*:

$$L = \rho E \cos \theta \quad (2-7)$$

dove: E è la *irradianza* in S_p (la radianza della sorgente, se non ci sono perdite), ρ è l'albedo di S_p , che varia da 0 (nero) a 1 (bianco), θ è l'angolo tra la direzione illuminante e la normale alla superficie S_p .

In termini vettoriali, indicando con \hat{n} il versore della normale e con \hat{i} la direzione illuminante, si ha:

$$L = \rho E \hat{i}^T \hat{n} \quad (2-8)$$

(spesso l'intensità della sorgente E viene inglobata in ρ : si parla allora di *albedo effettivo*).

5.5 – La riflessione speculare

La luce riflessa specularmente è una luce che viene riflessa dalla parte più esterna della superficie, e l'energia della radiazione riflessa è concentrata lungo una particolare direzione, che è quella per cui il raggio riflesso e quello incidente giacciono sullo stesso piano e l'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza. Questo è il comportamento di uno specchio perfetto, ma il comportamento di una superficie speculare è imperfetto e la distribuzione della radianza è una funzione complicata di Φ , angolo tra il raggio riflesso e la direzione di vista. Phong modellò questa distribuzione empiricamente nel modo seguente:

$$L = \rho E \cos^n \phi \quad (2-9)$$

Per una superficie lucida n è elevato (e diventa ∞ in uno specchio perfetto), mentre è basso per una superficie opaca. Nella realtà le superfici presentano un comportamento che è una combinazione di diffusione e riflessione speculare si può esprimere analiticamente come:

$$L = \rho E (k_s \cos \theta + k_d \cos \phi) \quad (2-10)$$

Nel modello di Phong, è anche presente un termine di radiazione ambientale costante, che non dipende dalla geometria.

5.6 – Le immagini digitali

Un sistema di acquisizione di immagini digitali consiste di tre componenti fondamentali: una telecamera, un *frame grabber* (che è una scheda di acquisizione) ed un calcolatore (*host*), come rappresentato nella Figura 2.7.

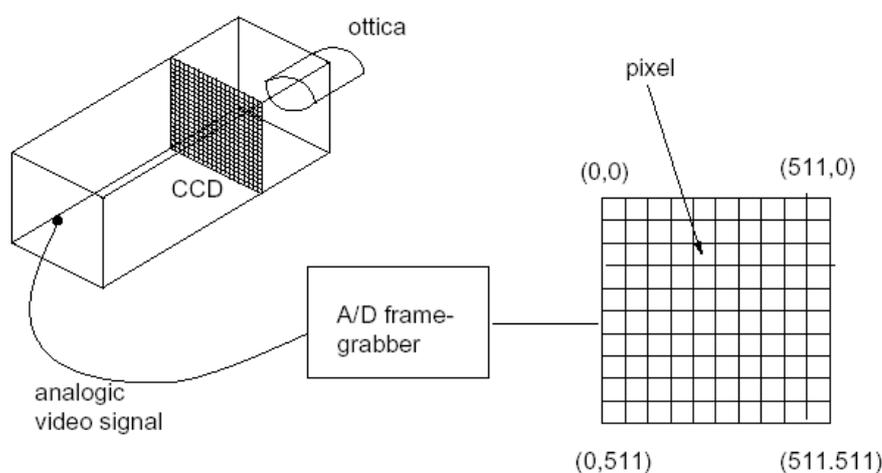


Figura 5.7 – Sistema di acquisizione digitale di immagini

La telecamera è composta dall'ottica che può essere approssimata con una lente sottile, e da una matrice di *CCD* (*Charged Copuled Device*) che costituisce il piano immagine, che misura circa 1x1 cm e contiene circa 5×10^5 elementi. Si può considerare quindi il piano immagine come una matrice $n \times m$ di celle rettangolari fotosensibili, ciascuna delle quali converte l'intensità della radiazione luminosa incidente in un potenziale elettrico. L'uscita della telecamera a *CCD* è un segnale elettrico analogico, ottenuto leggendo il potenziale degli elementi della matrice *CCD* per righe. Il segnale video (analogico) viene letto dal *frame grabber* (la scheda di acquisizione) che lo digitalizza, convertendolo in una matrice $N \times M$ (tipicamente 512×512) di valori interi (tipicamente 0...255) memorizzati in

un'opportuna area di memoria (*frame buffer*). Gli elementi della matrice prendono il nome di pixel (*picture element*). Si indicherà con $I(u;v)$ il valore dell'immagine (luminosità) nel pixel individuato dalla riga v e colonna u (sistema di coordinate $u;v$ con l'origine nell'angolo in alto a sinistra).

Il calcolatore *host* acquisisce l'immagine trasferendola dal *frame buffer* alla memoria centrale, la frequenza temporale che si raggiunge normalmente è attorno ai 25 Hz, ovvero un frame ogni 40 ms, dunque una telecamera trasferisce circa 12 Mb/s. La dimensione $n \times m$ della matrice *CCD* non è necessariamente la stessa dell'immagine $N \times M$ (matrice dei pixel) e per questo motivo la posizione di un punto del piano immagine è diversa se viene misurata in elementi *CCD* piuttosto che in pixel.

Si Possono utilizzare a riguardo le seguenti relazioni:

$$u_{pix} = \frac{N}{n} u_{CCD} \quad ; \quad v_{pix} = \frac{M}{m} v_{CCD} \quad (2-11)$$

E' opportuno assumere che vi sia una relazione uno ad uno tra pixel ed elementi *CCD*, immaginando che ad ogni pixel corrisponda un'area rettangolare sul *CCD* array, le cui dimensioni sono le dimensioni efficaci del pixel.



Figura 5.8 – Immagine di un ufficio (sinistra). Il blocco di 12x12 pixel evidenziato (cornetta del telefono) è mostrato ingrandito a destra

5.7 – Geometria e notazione

Giunti a questo punto del nostro studio, è necessario richiamare alcuni concetti legati al modello geometrico della formazione dell'immagine, constatando contemporaneamente come sono collegate tra loro la posizione di un punto nella scena e la posizione del punto corrispondente nell'immagine, mediante un modello geometrico del sensore. L'oggetto dell'analisi verterà, dapprima, sul modello della telecamera, successivamente, sul modello generale.

5.7.1 – Il modello della telecamera

Il modello geometrico più comune della telecamera è, come già visto, il cosiddetto modello *pinhole* o prospettico, il quale consiste (si faccia riferimento alla Figura 2.9) di un *piano retina* (o immagine) R e di un punto C detto *centro ottico* (o centro di proiezione) distante f (*lunghezza focale*) dal piano. La retta

passante per C ortogonale a R è l'asse ottico (asse z nella Figura 2.9) e la sua intersezione con R prende il nome di *punto principale*.

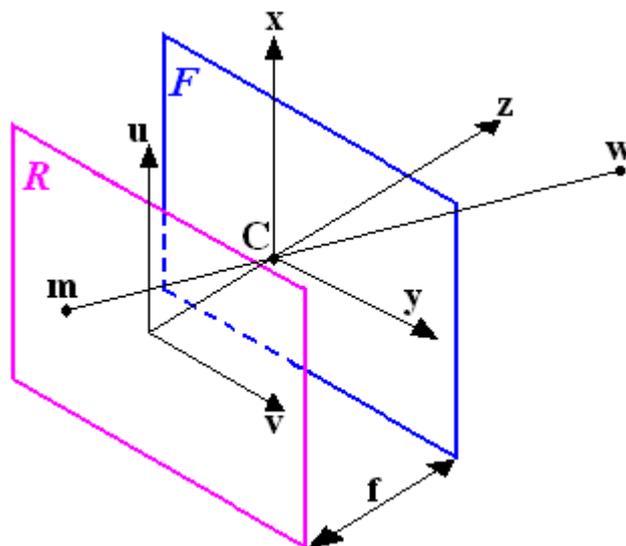


Figura 5.9 – Modello geometrico della telecamera

Per descrivere analiticamente la proiezione prospettica operata dalla telecamera, bisogna introdurre opportuni sistemi di riferimento cartesiani in cui esprimere le coordinate del punto dello spazio 3D e le coordinate del punto proiettato sul piano immagine.

Si consideri, inizialmente, un caso molto speciale, in cui i sistemi di riferimento sono scelti in modo da ottenere equazioni particolarmente semplici, si trascuri inoltre la *pixelizzazione*. Più avanti si complicherà il modello studiando il caso più generale.

5.7.2 – Un modello semplificato

Si introduca un sistema di riferimento destrorso $(x;y;z)$ per lo spazio tridimensionale (sistema *mondo*) centrato in C e con l'asse z coincidente con l'asse ottico, che prende il nome di sistema di *riferimento standard* della

telecamera. In altri termini, si sta fissando il riferimento mondo coincidente con il riferimento standard della telecamera. Si introduca anche un sistema di riferimento $(u;v)$ per il piano R centrato nel punto principale e con gli assi u e v orientati come x ed y rispettivamente, come mostrato nella Figura 2.9. Si consideri ora un punto nello spazio w di coordinate $(x;y;z)^T$ e la sua proiezione su R attraverso C , sia il punto m di coordinate $(u;v)^T$.

Mediante semplici considerazioni sulla similitudine dei triangoli (si veda la Figura 2.10), si può scrivere la seguente relazione:

$$\frac{-f}{z} = \frac{u}{x} = \frac{v}{y} \quad (2-12)$$

ovvero:

$$\begin{cases} u = \frac{-f}{z} x \\ v = \frac{-f}{z} y \end{cases} \quad (2-13)$$

Questa è la proiezione prospettiva (*perspective projection*), il passaggio dal sistema 3-D al 2-D chiaramente è non-lineare, ma diviene lineare usando il sistema di coordinate omogeneo.

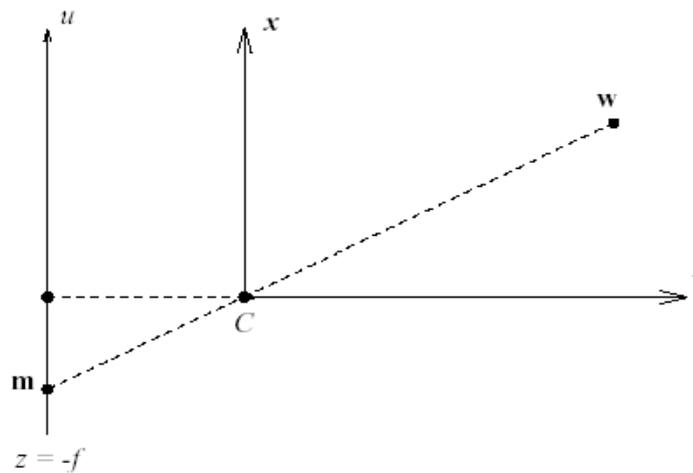


Figura 5.10 – Modello semplificato unidimensionale della telecamera

siano:

$$\tilde{m} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ l \end{bmatrix} \quad e \quad \tilde{w} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ l \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

rispettivamente le coordinate omogenee di m e w, (si userà d'ora innanzi l'indice superiore “~” per denotare le coordinate omogenee).

L'equazione di proiezione, in questo caso semplificato, si scrive allora:

$$\begin{bmatrix} ku \\ kv \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -fx \\ -fy \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ l \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

Si noti che il valore di k è uguale alla terza coordinata di w , che (in questa particolare trattazione semplificata) coincide con la distanza del punto dal piano XY ; se $k=0$ i punti sono proiettati all'infinito e non sono visibili sul piano F parallelo ad R e contenente C , ossia sul piano focale.

Quindi in coordinate omogenee l'equazione di proiezione si scriverà così:

$$k\tilde{m} = \tilde{P}w \quad o \quad \tilde{m} \cong \tilde{P}\tilde{w} \quad (2-16)$$

dove \cong significa “circa uguale” ad un fattore di scala arbitrario.

La matrice \tilde{P} rappresenta il modello geometrico della macchina fotografica, ed è chiamata *camera matrix* o *perspective projection matrix* che si indicherà da ora **PPM** (matrice di proiezione di prospettiva).

Nel caso ideale quando la distanza focale è -1 (il piano immagine è dietro il centro ottico), si ha:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [I | 0] \quad (2-17)$$

Questa forma della **PPM** codifica “l'essenza” della trasformazione prospettica, senza alcun parametro.

5.7.3 – Il modello generale

Un modello realistico di telecamera, che descriva la trasformazione da coordinate 3D a coordinate pixel, oltre che la trasformazione prospettica, deve tenere conto di:

- trasformazione rigida tra la telecamera e la scena;
- pixelizzazione, ossia forma e dimensione della matrice *CCD* e sua posizione rispetto al centro ottico.

Quest'ultimo aspetto viene preso in considerazione mediante la re-introduzione della distanza focale, la traslazione del centro ottico e la riscalatura indipendente degli assi *u* e *v*:

$$\begin{cases} u = k_u \frac{-f}{z} x + u_0 \\ v = k_v \frac{-f}{z} y + v_0 \end{cases} \quad (2-18)$$

dove: $(u_0; v_0)$ sono le coordinate del punto principale, mentre k_u (k_v) è l'inverso della dimensione efficace del pixel lungo la direzione *u* (*v*).

Le sue dimensioni fisiche sono: *pixel* * m^{-1}

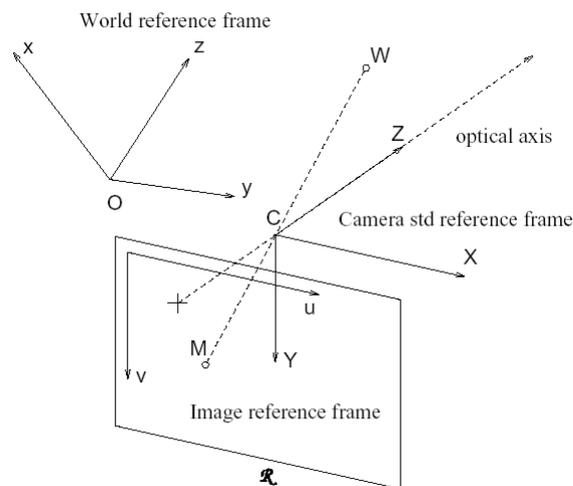


Figura 5.11 – Reference frames

Dopo questo aggiornamento delle equazioni, la *PPM* diventa:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} -fk_u & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & -fk_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = A[I|0] \quad (2-19)$$

dove:

$$A = \begin{bmatrix} -fk_u & 0 & u_0 \\ 0 & -fk_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-20)$$

Si ponga $\alpha_u = -fk_u$ e $\alpha_v = -fk_v$: si tratta della lunghezza focale espressa in pixel orizzontali e verticali rispettivamente. I parametri intrinseci, codificati nella matrice A , sono dunque i seguenti quattro: $\alpha_u, \alpha_v, u_0, v_0$; il modello più generale prevede anche un ulteriore parametro θ , l'angolo tra gli assi u e v :

$$A = \begin{bmatrix} -fk_u & fk_u \cot \theta & u_0 \\ 0 & \frac{-fk_v}{\text{sen}\theta} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

Se si introduce il cambio di coordinate:

$$\tilde{n} \longleftarrow A^{-1} \tilde{m} \quad (2-22)$$

la *PPM* si riduce alla matrice $[I|0]$: queste speciali coordinate prendono il nome di coordinate *normalizzate* o coordinate immagine, e per ritornare in coordinate normalizzate bisogna conoscere i parametri intrinseci.

Per tenere conto del fatto che il sistema di riferimento mondo di solito non coincide con il sistema di riferimento standard della telecamera, bisogna introdurre la trasformazione rigida che lega i due sistemi di riferimento.

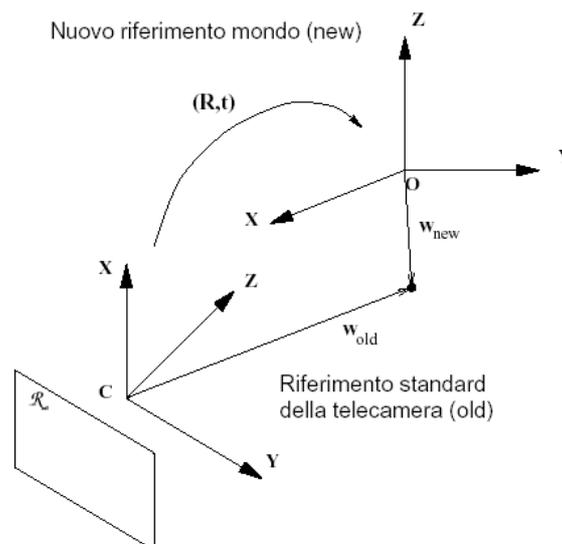


Figura 5.12 – Cambio di coordinate

Si introduca dunque un cambio di coordinate costituito da una rotazione R seguita da una traslazione t , ovvero:

$$w_{std} = R w_{new} + t \quad (2-23)$$

che in coordinate omogenee si scrive:

$$\tilde{w}_{std} = G \tilde{w}_{new} \quad (2-24)$$

dove:

$$G = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

Essendo:

$$\tilde{m} = \tilde{P}_{std} \tilde{w}_{std} = \tilde{P}_{std} G \tilde{w}_{new} \quad (2-26)$$

si ha:

$$\tilde{P}_{new} = \tilde{P}_{std} G \quad (2-27)$$

La PPM che si ottiene dopo questo cambiamento si può scrivere come:

$$\tilde{P} = A[I|0]G \quad (2-28)$$

Questa è la forma più generale della matrice di proiezione prospettica \tilde{P} , in cui la matrice A codifica i parametri intrinseci, la matrice G i parametri estrinseci, mentre la matrice $[I/O]$ rappresenta una trasformazione prospettica in coordinate *normalizzate* nel sistema di riferimento standard.

Ponendo:

$$t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad e \quad R = \begin{bmatrix} r_1^T \\ r_2^T \\ r_3^T \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

si ottiene la seguente espressione per \tilde{P} in funzione dei parametri intrinseci ed estrinseci:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \alpha_u r_1^T - \frac{\alpha_u}{\tan \theta} r_2^T + u_0 r_3^T & \alpha_u t_1 - \frac{\alpha_u}{\tan \theta} r_2^T t_2 + u_0 t_3 \\ \frac{\alpha_v}{\sin \theta} r_2^T + v_0 r_3^T & \frac{\alpha_v}{\sin \theta} t_2 + v_0 t_3 \\ r_3^T & t_3 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

Nell'ipotesi, spesso verificata nella pratica, che si abbia $\theta = \pi/2$, si ottiene:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \alpha_u r_1^T + u_0 r_3^T & \alpha_u t_1 + u_0 t_3 \\ \alpha_v r_2^T + v_0 r_3^T & \alpha_v t_2 + v_0 t_3 \\ r_3^T & t_3 \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

è da notare che \tilde{P} è composta da 12 elementi, ma dipende da $3+3+5=11$ parametri indipendenti, essendo infatti definita a meno di un fattore di scala

arbitrario (il 12° parametro), che si può eliminare ricorrendo ad una normalizzazione di \tilde{P} .

5.7.4 – Proprietà della PPM

Se si riporta la *PPM* nel modo seguente:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} q_1^T & | & q_{14} \\ q_2^T & | & q_{24} \\ q_3^T & | & q_{34} \end{bmatrix} = (P | \tilde{p}) \quad (2-32)$$

dall'equazione di proiezione (2-16), cioè: $k\tilde{m} = \tilde{P}w$

si ottiene per sostituzione:

$$\begin{bmatrix} ku \\ kv \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^T w + q_{14} \\ q_2^T w + q_{24} \\ q_3^T w + q_{34} \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

e si può così scrivere la proiezione prospettica in coordinate cartesiane in questo modo:

$$\begin{cases} u = \frac{q_1^T w + q_{14}}{q_3^T w + q_{34}} \\ v = \frac{q_2^T w + q_{24}}{q_3^T w + q_{34}} \end{cases} \quad (2-34)$$

Si è visto che il piano focale, che contiene i punti che si proiettano sulla retta all'infinito del piano immagine, ha equazione $k=0$, ovvero, $q_3^T w + q_{34} = 0$. La quantità k , che compare nella $k\tilde{m} = \tilde{P}\tilde{w}$, può essere interpretata come la *distanza del punto W dal piano focale*. Infatti dalle equazioni (2-29) e (2-30) si ha:

$$\tilde{m}_2^T F \tilde{m}_1 = 0 \quad e \quad k = r_3^T w + t_3 \quad (2-35)$$

e poiché $\tilde{w}_{std} = G\tilde{w}_{new}$, k è la terza coordinata di w nel riferimento standard della telecamera, e quindi proprio la sua distanza dal piano focale.

La generica *PPM* ha dunque rango massimo, ovvero 3. Se avesse rango minore la proiezione di un punto non sarebbe un punto, ma un sottospazio di dimensione maggiore, allora il suo nucleo ha dimensione 1 e corrisponde all'unico punto, il centro ottico C per il quale la proiezione non è definita:

$$\tilde{P} \begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2-36)$$

(si noti che 0 non rappresenta alcun punto in coordinate omogenee). Dunque, risolvendo l'equazione precedente, si ottiene l'espressione di C :

$$C = -P^{-1}\tilde{p} \quad (2-37)$$

Il raggio ottico del punto m è la linea che passa per il centro ottico C ed m , ovvero il luogo geometrico dei punti $w: \tilde{m} = \tilde{P}\tilde{w}$. Sul raggio ottico giacciono tutti i

punti dello spazio dei quali il punto m può essere la proiezione: un punto che appartiene a questa linea è il centro ottico appena calcolato.

Un altro punto, come si può facilmente verificare, è il punto (ideale):

$$\begin{bmatrix} P^{-1}\tilde{m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

L'equazione parametrica del raggio ottico in coordinate proiettive è la seguente:

$$\tilde{w} = \begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} P^{-1}\tilde{m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

ed in coordinate euclidee assume la forma:

$$w = c + \lambda P^{-1}\tilde{m} \quad (2-40)$$

5.8 – Geometria Epipolare

L'analisi, a questo punto, si concentra sul tipo di relazione che lega due immagini di una stessa scena ottenute da due telecamere diverse, o dalla medesima telecamera in movimento, e in particolare, dato un punto m_1 nella immagine 1, quali vincoli esistono sulla posizione del suo coniugato m_2 nella immagine 2, intendendo per *coniugati* due punti in due immagini distinte che sono la proiezione dello stesso punto 3D). Alcune semplici considerazioni

geometriche indicano che il punto coniugato di m_1 deve giacere su di una linea retta nella immagine 2, chiamata *retta epipolare* di m_1 .

La geometria epipolare è importante anche (e soprattutto) perchè descrive la relazione tra due viste di una stessa scena, dunque è fondamentale in qualunque tecnica di Visione Computazionale (VC) basata su più di una immagine perchè permette di limitare l'area di ricerca dei punti corrispondenti. Tale situazione non è un caso particolare, ma è dovuta ad un vincolo intrinseco dei sistemi di visione stereoscopica, qualsiasi sia la posizione relativa delle telecamere.

Si consideri il caso illustrato in Figura 2.13.

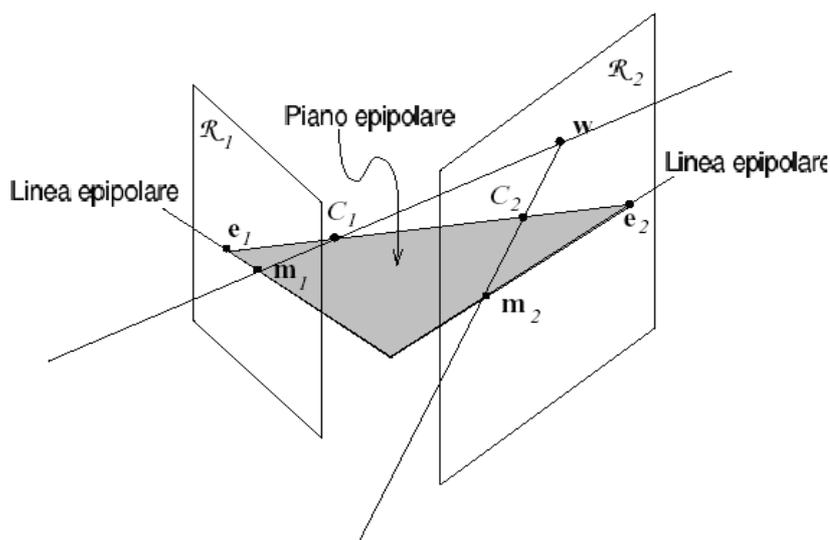


Figura 5.13 – Geometria epipolare

Dato un punto m_1 nella immagine 1, il suo coniugato m_2 nella immagine 2 è vincolato a giacere sull'intersezione del piano immagine con il piano determinato da m_1 , C_1 e C_2 , detto piano epipolare, e questo perchè il punto m_2 può essere la proiezione di un qualsiasi punto nello spazio giacente sul raggio ottico di m_1 . Inoltre, si osserva che tutte le linee epipolari di una immagine passano per uno

stesso punto, chiamato *epipolo*, e che i piani epipolari costituiscono un fascio di piani che hanno in comune la retta passante per i centri ottici C_1 e C_2 . Il segmento che unisce C_1 e C_2 prende il nome di linea di base (o *baseline*).

5.8.1 – Matrice Fondamentale

Fissato un sistema di riferimento assoluto, date due telecamere 1 e 2, dalle considerazioni fatte in precedenza si può affermare che:

$$\begin{cases} \tilde{m}_1 \cong \tilde{P}_1 \tilde{w} \\ \tilde{m}_2 \cong \tilde{P}_2 \tilde{w} \end{cases} \quad (2-41)$$



Figura 5.14 – nell’immagine a destra sono disegnate le rette epipolari corrispondenti ai punti marcati con la croce nella immagine sinistra.

La linea epipolare corrispondente ad m_1 è la proiezione secondo \tilde{P}_2 del raggio ottico di m_1 , che, come si è già visto (equazione (2-38)), ha equazione:

$$\tilde{w} = \begin{bmatrix} c \\ 1 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} P^{-1}\tilde{m} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

Siccome:

$$\tilde{P}_2 \begin{bmatrix} c_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \tilde{P}_2 \begin{bmatrix} -P_1^{-1}\tilde{p}_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \tilde{p}_2 - P_2 P_1^{-1} \tilde{p}_1 = e_2 \quad (2-43)$$

e

$$\tilde{P}_2 \begin{bmatrix} P_1^{-1}\tilde{m}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = P_2 P_1^{-1} \tilde{m}_1 \quad (2-44)$$

la retta epipolare di \tilde{m}_1 ha equazione:

$$\tilde{m}_2 \cong \tilde{e}_2 + \lambda P_2 P_1^{-1} \tilde{m}_1 \quad (2-45)$$

Questa è l'equazione (in coordinate omogenee) della retta passante per i punti \tilde{e}_2 (l'epipolo) e $P_2 P_1^{-1} \tilde{m}_1$. La retta passante per due punti è rappresentata dal prodotto esterno dei due punti, quindi la linea epipolare di m_1 è rappresentata in coordinate omogenee dal vettore:

$$\hat{e}_2 \wedge P_2 P_1^{-1} \tilde{m}_1 = [\tilde{e}_2] \wedge P_2 P_1^{-1} \tilde{m}_1 = F \tilde{m}_1 \quad (2-46)$$

Dove $([\tilde{e}_2] \wedge)$ è una matrice antisimmetrica che agisce come il prodotto esterno con \tilde{e}_2 .

La matrice:

$$F = [\tilde{e}_2] \wedge P_2 P_1^{-1} \quad (2-47)$$

prende il nome di *matrice fondamentale*.

Il punto coniugato di m_1 , m_2 giace sulla linea epipolare, dunque soddisfa l'equazione seguente, che viene spesso indicata come *Equazione di Longuet-Higgins*:

$$\tilde{m}_2^T F \tilde{m}_1 = 0 \quad (2-48)$$

La matrice fondamentale contiene tutta l'informazione relativa alla geometria epipolare, e per ora serve solo per tracciare le rette epipolari, ed è espressa e calcolata come funzione delle due *PPM*, ma può essere calcolata direttamente dalle immagini, anche quando la calibrazione (cioè le *PPM*) non sia disponibile.

5.8.2 – Disegno delle rette epipolari

Opportunamente, ora, si analizzerà come si possono disegnare nella pratica le rette epipolari. Si necessita della matrice fondamentale, che si può calcolare note le matrici di proiezione prospettica delle due telecamere.

Di seguito è riportato un esempio di come si può sviluppare un codice di calcolo per ricavare la matrice fondamentale F .

Il seguente codice MATLAB calcola la matrice fondamentale F ed i due epipoli el , er , a partire dalle due PPM pml e pmr .

```
function [F,el,er] = fund(pml,pmr)
%
% centri ottici
cl = - inv(pml(:,1:3))*pml(:,4);
cr = - inv(pmr(:,1:3))*pmr(:,4);

% epipoli come proiezione dei centri ottici
er = pmr * [cl' 1]';
el = pml * [cr' 1]';

% matrice fondamentale
F = [
    0 -er(3) er(2)
    er(3) 0 -er(1)
    -er(2) er(1) 0] * pmr(:,1:3)* inv(pml(:,1:3)) ;
```

Una volta ottenuta la matrice fondamentale F , per disegnare la retta epipolare di un punto $m=[u,v]$ che appartiene all'immagine sinistra, basta calcolare $F * [m \ 1]'$ ottenendo così un vettore di 3 elementi $[a,b,c]$, che sono i coefficienti della equazione cartesiana della retta epipolare nella immagine destra: $a*u + b*v + c = 0$.

5.8.3 – Rettificazione epipolare

Quando C_l è nel piano focale della telecamera di destra, l'epipolo destro è all'infinito e le linee epipolari formano un fascio di linee parallele nella immagine di destra.

Un caso molto speciale si ha quando entrambe gli epipoli sono all'infinito, cosa che accade quando la linea $C_1 C_2$, ossia la *vaseline*, è contenuta in entrambi i piani focali, ovvero i piani retina sono paralleli alla linea di base. In questo caso, allora, le linee epipolari formano un fascio di linee parallele in entrambe le immagini. Il caso in cui le linee epipolari sono parallele ed orizzontali costituisce una situazione particolarmente favorevole per il calcolo delle corrispondenze: punti corrispondenti giacciono sulla stessa riga della immagine (vista come una matrice di pixel). Qualunque coppia di immagini può essere trasformata in modo che le linee epipolari siano parallele ed orizzontali in ciascuna immagine, come mostrato in Figura 2.15. Questo processo prende il nome di *rettificazione*.



Figura 5.15 - Coppia stereo rettificata. Le linee epipolari sono parallele ed hanno la stessa ordinata dei punti corrispondenti marcati con + nella immagine destra.

5.9 – La calibrazione

Partendo dall'osservazione che un'accurata calibrazione della telecamera è di vitale importanza per ogni task di ricostruzione 3-D è naturale porre l'attenzione sui metodi con cui la calibrazione della telecamera è ottenuta negli

algoritmi. Si suole distinguere tra gli algoritmi che assumono una calibrazione a priori della telecamera (*ricostruzione precalibrata*) e quelli che possono ottenere la calibrazione in tempo reale (real-time), detta ricostruzione con calibrazione on-line.

Per esempio quando l'obiettivo è ottenere un modello 3-D molto accurato ed è possibile avere accesso alla telecamera in modo che possa essere realizzata una sua piena calibrazione, sarà meglio selezionare un algoritmo di ricostruzione precalibrato, invece, se l'obiettivo è ricostruire una scena da alcune sequenze video precedentemente registrate dovremmo usare allora un metodo di ricostruzione con calibrazione on-line.

Gli algoritmi all'interno di queste due grandi categorie sopramenzionate sono ulteriormente suddivisi in accordo con i principi comuni secondo cui gli algoritmi sono progettati.

5.9.1 – La ricostruzione precalibrata

Nella ricostruzione precalibrata vengono individuate le classi di algoritmi “*image-base*” o “*feature-based*” e classi di algoritmi “*voxel-based*”.

- La prima classe cioè *feature-based* contiene algoritmi che calcolano le ricostruzioni o accoppiando (matching) caratteristiche di interesse (features) estratte dalle immagini che forniscono mappe di profondità sparse, o da corrispondenze stereo fornendo una mappa di profondità densa.
- La seconda classe, cioè gli algoritmi della classe *voxel based*, sono quelli che lavorano discretizzando lo spazio della scena in un set di voxel.

5.9.2 – La calibrazione on-line

Nella ricostruzione con calibrazione on-line, gli algoritmi sono classificati rispetto a come viene calcolata la calibrazione della telecamera, questo per il motivo che la differenza fondamentale degli algoritmi di questa categoria sta nel modo in cui i parametri della telecamera sono calcolati.

C'è quindi una distinzione fra algoritmi che sfruttano *vincoli sulla scena* (scene constraint) e quelli che sfruttano *vincoli di natura geometrica*.

- Gli algoritmi che appartengono alla classe “*scene constraint*” sono quelli che traggono vantaggio da particolari strutture della scena come linee parallele all'interno della scena e calcolano i punti di fuga in ogni direzione principale per determinare i parametri intrinseci ed estrinseci della telecamera.
- Al contrario gli algoritmi nella seconda classe non assumono alcuna conoscenza a priori sulla struttura della scena, essi stimano i parametri della telecamera usando l'immagine proiettata di un oggetto geometrico astratto chiamato “*absolute conic*”.

La calibrazione consiste quindi nel misurare con accuratezza i parametri intrinseci ed estrinseci del modello della telecamera. Poiché questi parametri governano il modo in cui punti dallo spazio si proiettano sulla retina, l'idea è che conoscendo le proiezioni di punti 3D di coordinate note (punti di calibrazione), sia possibile ottenere i parametri incogniti risolvendo le equazioni della proiezione prospettica.

Alcuni metodi *diretti* di calibrazione, come quello di Caprile e Torre [Caprile 90] e quello di Tsai [Tsai 87] formulano il problema della calibrazione identificando come incognite i parametri della telecamera.

Il metodo di calibrazione che si illustrerà, tratto da [Faugeras 93], risolve il problema di stimare la *PPM* e successivamente ricava i parametri dalla matrice. In molte applicazioni, la conoscenza della *PPM* è sufficiente ed il secondo passo non è necessario.

5.10 – Estrazione delle caratteristiche

Si analizzerà, ora, il modo in cui avviene l'estrazione delle caratteristiche di un'immagine, considerando uno degli algoritmi più importanti in proposito, cioè il metodo di estrazione degli angoli proposto da Harris e Stephens.

Infatti per quanto gli *edge* (bordi) siano una rappresentazione intermedia dell'immagine ricca e utile per molti scopi, come evidenziato da Marr, essi sono a volte insufficienti, in particolare, quando è in gioco la disparità (o il moto) tra immagini. In tal caso, solo la traslazione di un edge lungo la direzione ad esso normale può essere rilevata: è il problema dell'apertura. Gli angoli, invece, sono caratterizzati dall'aver una ricca struttura bidimensionale, che li rende distintivi, quindi facili da mettere in corrispondenza senza ambiguità, e numerosi operatori sono stati proposti per il rilevamento di angoli nelle immagini.

Si presenterà ora un operatore basato sull'analisi locale dell'autocorrelazione di una finestra, che rileva zone caratteristiche adatte per essere messe in corrispondenza. E' improprio definire questo operatore come estrattore di angoli, accade però che tali zone spesso coincidano proprio con punti che risultano essere "angoli".

5.10.1 – Il metodo di estrazione degli angoli di Harris e Stephens

Si può iniziare questa trattazione rilevando le differenze formali che esistono tra un edge (inteso come bordo) ed un angolo.

Un *angolo* è caratterizzato da una discontinuità della intensità lungo due direzioni, che può essere rilevata misurando quanta variazione si ottiene traslando una zona dell'immagine in un intorno della posizione originale. Se in una direzione è possibile traslare la zona senza apprezzabili variazioni, si è in presenza di un edge (lungo la direzione data), se viceversa, in ogni direzione la variazione cresce rapidamente si ha un angolo.

Si calcoli, allora, la variazione, in termini di somma delle differenze al quadrato (*SSD*), che si ottiene traslando della quantità h una zona W centrata nel punto $x = (u;v)$ dell'immagine I :

$$E_h(x) = \sum_{d \in W} [I(x+d) - I(x+d+h)]^2 \quad (2-49)$$

Utilizzando lo sviluppo in serie di Taylor troncato, si ottiene:

$$\begin{aligned} E_h(x) &= \sum_{d \in W} [\nabla I(x+d)^T h]^2 = \sum_{d \in W} h^T (\nabla I(x+d)) (\nabla I(x+d))^T h = \\ &= \sum_{d \in W} h^T \begin{pmatrix} I_u^2 & I_u I_v \\ I_u I_v & I_v^2 \end{pmatrix} h = h^T \begin{pmatrix} \sum_{d \in W} I_u^2 & \sum_{d \in W} I_u I_v \\ \sum_{d \in W} I_u I_v & \sum_{d \in W} I_v^2 \end{pmatrix} h \end{aligned} \quad (2-50)$$

dove si è posto:

$$\nabla I(x+d) = [I_u I_v]^T \quad (2-51)$$

Introducendo una funzione peso $w(\cdot)$ che vale 1 sugli elementi di un dominio rettangolare e 0 all'esterno, si può scrivere:

$$E_h(x) = h^T \begin{pmatrix} \sum_d I_u^2 w(d) & \sum_d I_u I_v w(d) \\ \sum_d I_u I_v w(d) & \sum_d I_v^2 w(d) \end{pmatrix} h \quad (2-52)$$

Invece di prendere la finestra rettangolare, per rendere simmetrico e più regolare l'operatore è conveniente considerare una finestra pesata gaussiana:

$$w(d) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\|d\|^2}{2\sigma^2}} \quad (2-53)$$

Dunque, la variazione (SSD) filtrata in un intorno di x , per lo spostamento h è data da:

$$\hat{E}_h(x) = h^T \hat{C} h \quad (2-54)$$

Dove \hat{C} è la matrice simmetrica 2×2 di seguito riportata:

$$\hat{C} = \begin{pmatrix} \hat{I}_u^2 & \hat{I}_u \hat{I}_v \\ \hat{I}_u \hat{I}_v & \hat{I}_v^2 \end{pmatrix} \quad (2-55)$$

mentre \hat{I}_u e \hat{I}_v indicano rispettivamente il risultato della convoluzione di I_u e I_v con la finestra gaussiana w .

Una elementare analisi spettrale assicura che, preso h unitario sarà:

$$\lambda_1 < E_h(x) < \lambda_2 \quad (2-56)$$

Dove λ_1 e λ_2 sono rispettivamente il minimo ed il massimo autovalore di \hat{C} . Quindi, se si considerano tutte le possibili direzioni h , il massimo della variazione che si ottiene è λ_2 , mentre il minimo è λ_1 .

Si può quindi classificare la struttura dell'immagine attorno a ciascun pixel analizzando gli autovalori λ_1 e λ_2 .

I casi che possono presentarsi sono i seguenti:

- Nessuna struttura: $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx 0$
- *Edge*: $\lambda_1 \approx 0$ (direzione dell'*edge*), $\lambda_2 \gg 0$
- Angoli: λ_1 e λ_2 entrambi $\gg 0$ e distinti

L'algoritmo proposto da Harris & Stephens non calcola esplicitamente gli autovalori, ma la quantità:

$$R = \det(\hat{C}) - k \cdot \text{tr}(\hat{C})^2 \quad (2-57)$$

e considera come angoli i punti in cui il valore di R supera una certa soglia.

La costante k viene posta pari a 0,04 (come suggerito da Harris).

Si noti che:

$$\text{tr}(\hat{C}) = \lambda_1 + \lambda_2 = \hat{I}_u^2 + \hat{I}_v^2 \quad (2-58)$$

e

$$\det(\hat{C}) = \lambda_1 \lambda_2 = \hat{I}_u^2 \hat{I}_v^2 - (\hat{I}_u \hat{I}_v)^2 \quad (2-59)$$

Partendo dalle medesime considerazioni sugli autovalori, Noble propone un operatore basato anch'esso sulla traccia e sul determinante della matrice \hat{C} ma privo di parametri [Noble 88], per ogni punto dell'immagine viene calcolato il seguente rapporto:

$$N = \frac{\det(\hat{C})}{\text{tr}(\hat{C})} \quad (2-60)$$

il quale in corrispondenza degli angoli fornisce valori elevati.

Riassumendo quanto appena detto, l'algoritmo presenta le seguenti fasi:

1. Si calcolano le derivate dell'immagine I_u e I_v ;
2. Si filtrano le due derivate con un nucleo gaussiano (la deviazione standard della gaussiana fissa la scala spaziale alla quale si vogliono determinare gli angoli) ottenendo \hat{I}_u e \hat{I}_v ;

3. Si calcola in ciascun punto la quantità R (o N) con le espressioni (2-57) e (2-60)
4. Si effettua la soppressione locale dei non-massimi (facoltativa) e la soglia a un valore prefissato;
5. I punti risultanti sono angoli (o punti di interesse).



Figura 5.16 - Da sinistra: immagine di prova; risultato (non soglia) dell'operatore di Harris & Stephens (per ragioni di stampa, il nero indica il valore più elevato); punti estratti con soppressione locale dei non-massimi e la soglia.

5.11 – Estrazione dei parametri

La macchina fotografica è modellata dalla sua matrice di proiezione prospettica, che ha la forma di seguito riportata ricavata precedentemente:

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} \alpha_u r_1^T - \frac{\alpha_u}{\tan \theta} r_2^T + u_0 r_3^T & \alpha_u t_1 - \frac{\alpha_u}{\tan \theta} r_2^T t_2 + u_0 t_3 \\ \frac{\alpha_v}{\sin \theta} r_2^T + v_0 r_3^T & \frac{\alpha_v}{\sin \theta} t_2 + v_0 t_3 \\ r_3^T & t_3 \end{bmatrix} \quad (2-61)$$

che può essere decomposta, usando la fattorizzazione QR, nel prodotto:

$$\tilde{P} = A[R | t] = [AR | At] \quad (2-62)$$

Effettivamente, dato $\tilde{P} = [Q | \tilde{q}]$, dal paragone con la (2-61) si ottiene $Q=AR$, che è:

$$Q^{-1} = R^{-1} A^{-1} \quad (2-63)$$

Sia $Q^{-1} = UB$ la QR fattorizzazione di Q^{-1} , dove U è ortogonale e B è il triangolo superiore.

Da questo momento siano: $R=U^{-1}$; $A=B^{-1}$ e $t = A^{-1}\tilde{q} = B\tilde{q}$

5.11.1 – Stima della PPM

I punti di calibrazione sono gli angoli dei quadrati della griglia della Figura 2.17 (sinistra), le cui coordinate sono note per costruzione. Il sistema di riferimento viene fissato solidale con la griglia, come illustrato nella Figura 2.17 (destra), e le coordinate delle immagini dei punti di calibrazione possono essere ricavate con i metodi classici della elaborazione delle immagini, ricordando che la

precisione con la quale vengono localizzati tali punti influenza in modo sensibile l'accuratezza della calibrazione.

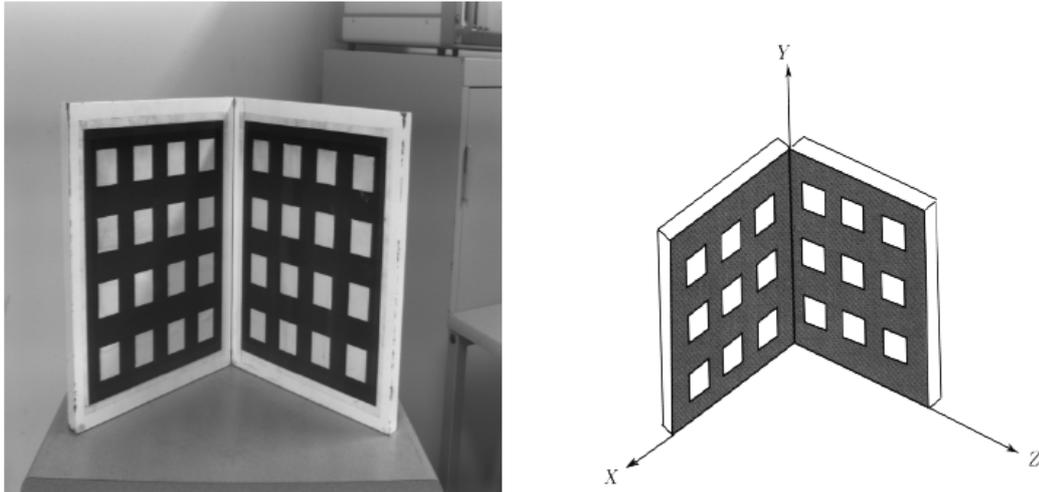


Figura 5.17 – Griglia usata per la calibrazione (sinistra) e sistema di riferimento assoluto (destra).

5.11.2 – Metodo lineare 1

Dati N punti di calibrazione non coplanari, ciascuna corrispondenza tra un punto dell'immagine $m_i=(u_i;v_i)^T$, ed il punto della scena w_i fornisce una coppia di equazioni:

$$\begin{cases} (q_1 - u_i q_3)^T w_i + q_{14} - u_i q_{34} = 0 \\ (q_2 - v_i q_3)^T w_i + q_{24} - v_i q_{34} = 0 \end{cases} \quad (2-64)$$

La *PPM* (incognita) consiste di 12 elementi, ma essendo definita a meno di una costante (a causa delle coordinate omogenee), le incognite sono in realtà solo

11, come è stato già precisato. In teoria quindi, 6 punti non complanari sono sufficienti per il calcolo di \tilde{P} , ma nella pratica sono disponibili molti più punti e viene risolto un problema di minimi quadrati. Per N punti si ottiene un sistema di 2N equazioni lineari omogenee e si può scrivere:

$$Lq = 0 \quad (2-65)$$

dove L è la matrice $2N \times 12$ che dipende dalle coordinate dei punti di calibrazione, mentre q è il vettore $[q_1^T; q_{14}; q_2^T; q_{24}; q_3^T; q_{34}]^T$ delle incognite. Il rango di L è in generale 11 ma al fine di evitare la soluzione banale $q=0$ bisogna aggiungere un vincolo, ed è naturale usare come vincolo $\|q_3\|=1$ ottenendo: $\min \|Lq\|$.

Il problema di ottimizzazione vincolata viene risolto mediante i moltiplicatori di Lagrange.

5.11.3 – Metodo lineare 2

Se invece di usare il vincolo $\|q_3\|=1$ si pone $q_{34}=1$ si ottiene per ciascun punto la coppia di equazioni:

$$\begin{pmatrix} w_i^T & 1 & 0 & 0 & -u_i w_i^T \\ 0 & 0 & w_i^T & 1 & -v_i w_i^T \end{pmatrix} (q_1^T; q_{14}; q_2^T; q_{24}; q_3^T) = \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \quad (2-66)$$

Per N punti si ottiene un sistema lineare di $2N$ equazioni, la cui soluzione (ai minimi quadrati) si può ottenere calcolando la *pseudoinversa* della matrice $2N \times 11$ del sistema.

La *PPM* così calcolata non è adatta per essere scritta nella forma (2), se non viene “normalizzata” in modo che sia $\|q_3\|=1$.

5.11.4 – Metodo non lineare

È possibile riformulare il problema della calibrazione in maniera non lineare, minimizzando la seguente quantità soggetta al vincolo $\|q_3\|=1$:

$$E = \sum_{i=1}^n \left\| \frac{q_1^T w_i + q_{14}}{q_3^T w_i + q_{34}} - u_i \right\|^2 + \left\| \frac{q_2^T w_i + q_{24}}{q_3^T w_i + q_{34}} - v_i \right\|^2 \quad (2-67)$$

che rappresenta la distanza sulla retina tra i punti m_i e le ri-proiezioni dei punti w_i .

Vengono quindi impiegate tecniche di risoluzione di problemi di minimizzazione vincolata non lineare, che danno inoltre soluzioni meno sensibili al rumore nelle coordinate dei punti di calibrazione.

5.12 – Analisi dell’immagine

Per effettuare un’accurata ed efficace analisi delle immagini o dei video acquisiti è necessario considerare innanzitutto i concetti di base legati

all'acquisizione delle immagini. Per questo si studieranno quali sono le caratteristiche di partenza dell'immagine sorgente che si deve analizzare, e come si può migliorare la percezione della stessa da parte del sistema di visione.

5.12.1 – Gli istogrammi

A causa di fattori esterni può capitare che durante l'acquisizione di un'immagine si abbia una predominanza di una tonalità che va a coprire in parte le altre, la stessa cosa si può avere anche per quello che riguarda la luminosità di un'immagine, tanto che a volte risulta troppo scura o troppo chiara (è anche possibile trovare immagini in scala di grigio dove però vi è un piccolo range di variazione di intensità). Per risolvere questo problema si può lavorare sull'istogramma dell'immagine stessa.

Un *istogramma* è la rappresentazione grafica della presenza di un colore. L'asse delle ascisse viene suddiviso in tante parti, tante quanti sono gli elementi della scala del colore che si vuole diagrammare (per esempio se si utilizzano 8-bit per fornire la gradazione di rosso, l'ascissa verrà suddivisa in $2^8=256$ punti), poi si scansiona l'immagine e per ogni pixel che apporta un'informazione del colore scelto si incrementa il valore delle ordinate di 1 in corrispondenza del valore di colore che apporta. Perciò si avrà che un'immagine con poca variazione di intensità avrà un istogramma concentrato in una zona (cioè il colore prevalente nell'immagine).

Ad un'immagine è associato uno e un solo istogramma, mentre ad un istogramma posso associare più immagini differenti.

Importante è notare che traslazioni e rotazioni di un'immagine non ne modificano l'istogramma. L'equalizzazione di un'immagine invece fa perdere informazioni e ne varia l'istogramma.

Il problema di una tonalità dominante può essere risolto “stirando” l'asse delle ascisse in maniera tale da ridistribuire i valori del colore in maniera proporzionale. La formula che permette di “equalizzare” l'istogramma ed espandere i valori concentrati nell'intervallo $[a,b]$ alla intervallo espanso $[z_k, z_l]$ è la seguente:

$$z' = \frac{z_k - z_l}{b - a} (z - a) + z_l = \frac{z_k - z_l}{b - a} z + \frac{z_l b - z_k a}{b - a} \quad (2-68)$$

Nella Figura 2.18 viene mostrato come andando a modificare la curva dell'istogramma (inizialmente schiacciata) relativa ad un'immagine si riesce a trarre altre informazioni: compaiono elementi (maschera per saldare, perni e bulloni) che prima non si distinguevano.

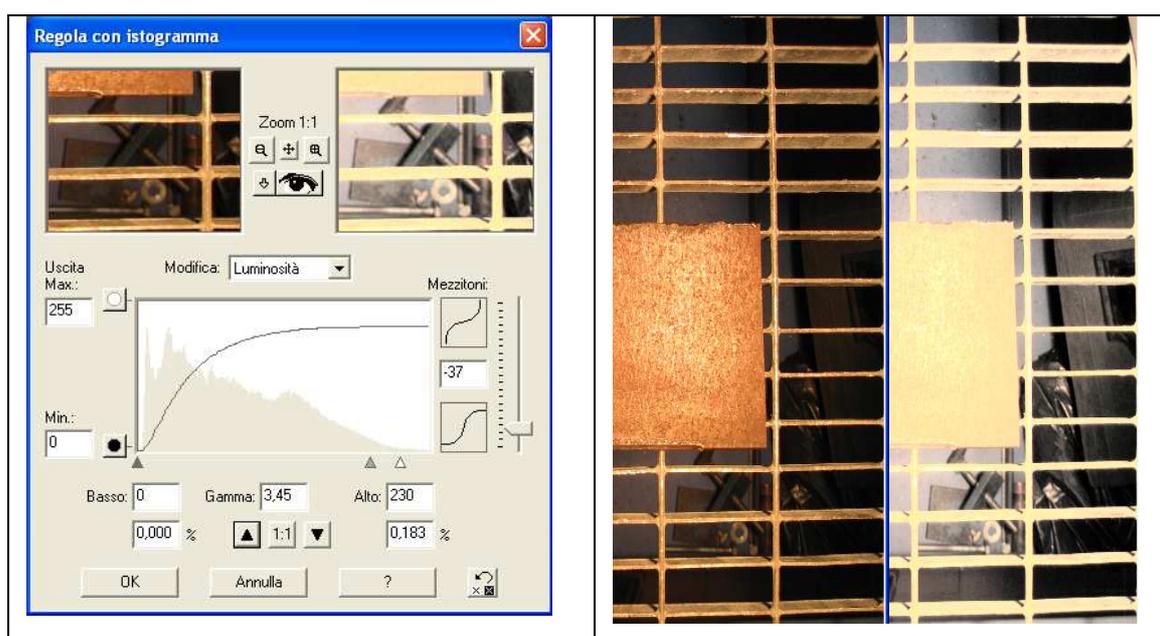


Figura 5.18 – Risultati ottenuti con la modifica della curva dell’istogramma

Questi elementi apparsi creeranno problemi nelle successive fasi di analisi di ricerca e posizionamento delle piastre sul piano di lavoro (la griglia) “confondendo il sistema” a causa della presenza di un background (sfondo) non uniforme. È bene allora accertarsi che il piano inferiore della macchina sia sgombero da oggetti e quanto più possibile uniforme nella colorazione.

5.12.2 – Ricerca dei confini di un oggetto

L’operazione di ricerca dei confini di un oggetto sarà spesso utilizzata per la ricerca e l’identificazione delle piastre sul piano di lavoro, per la ricerca del gap, e per la successiva analisi dimensionale. Gli algoritmi su cui si fonda questa ricerca già sono stati studiati precedentemente. Ora si analizzerà come funzionano praticamente, e successivamente si indicheranno gli algoritmi relativi al programma di visione utilizzato.

5.12.3 – La trasformata di Hough

Trovare i confini di un oggetto è molto diverso dal tracciarne il contorno, e per farlo si può usare il metodo che utilizza la trasformata di Hough.

Questo sistema è tale da permettere di trovare il contorno di un oggetto, anche con una scarsa conoscenza di dati, a patto che il contorno stesso possa essere descritto da curve parametriche (per esempio rette o curve coniche). Tale metodo risulta anche essere immune al rumore o alla mancanza di punti che descrivono la curva dell'oggetto stesso.

Si consideri il problema di determinare una singola linea in un'immagine supponendo che l'immagine stessa sia già stata elaborata da qualche algoritmo che ha trovato i pixel che delineano i confini dell'oggetto. La tecnica di Hough organizza questi pixel in linee rette considerando tutte le possibili linee rette che si ottengono tracciando solo quelle che meglio rappresentano i pixel dell'insieme di partenza.

Considerando una coppia di punti $[(x',y'),(x'',y'')]$ sul piano x,y vi sarà una sola retta di equazione $y=mx+c$ che intercetterà i punti dati. Data questa equazione perciò è possibile definire univocamente la coppia (m,c) che, in un piano cartesiano m,c , identifica univocamente un punto. È possibile anche dire che in questo nuovo piano, tutte le rette $c=-mx+y$ che passano per questo punto (m,c) hanno una coppia di coefficienti (x,y) che soddisfano la prima equazione della retta che era stata data. Tutto ciò è mostrato nella Figura 2.19.

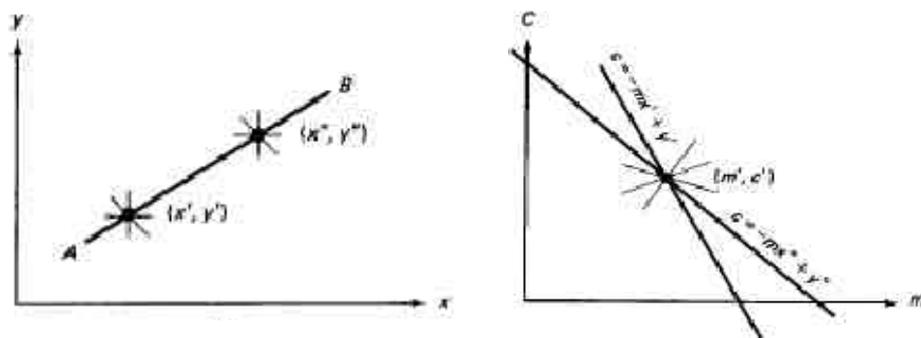


Figura 5.19 – Rappresentazione grafica della biunivocità tra i piani x,y e c,m .

Con l'Algoritmo di Hough e grazie a questa biunivocità tra i due spazi, è possibile seguire questi passi:

- Suddividere lo spazio parametrico (m,c) in maniera che possa contenere il max e min valore di m e c .
- Supporre che ciascuna cella in questo spazio sia un accumulatore numerico che viene inizializzato a zero.
- Per ogni punto nello spazio (x,y) dell'immagine che soddisfa l'equazione di partenza incrementare di una unità il valore della cella di accumulazione.
- Alla fine l'accumulatore che avrà il massimo valore sarà anche quello che modellerà meglio la ricerca dell'oggetto.

5.12.4 – La segmentazione

L'obiettivo della segmentazione è dividere un'immagine acquisita da una telecamera o da un altro dispositivo in modo tale da creare zone i cui pixel vengono ad avere una particolare proprietà in comune. Questa divisione viene eseguita poiché ogni pixel che appartiene ad un oggetto presente in un'immagine

ha caratteristiche in comune con quelli ad esso adiacenti se anch'essi appartengono all'oggetto ritratto.

La segmentazione di un'immagine gode di alcune proprietà. Sia S l'insieme dei pixel che compongono l'immagine e P_i l'insieme dei sottospazi che si sono venuti a creare le proprietà della segmentazione sono:

- *Completezza*: $\bigcup_{i=0}^n P_i = S$ cioè l'intera immagine, $\{P_i\}$ rappresenta una partizione esaustiva.
- *Unicità*: $P_i \cap P_j = 0$ con $i, j \in \{P_i\}$ è una partizione esclusiva.
- *Omogeneità*: in ogni regione P_i i pixel che vi appartengono hanno qualche proprietà in comune.
- *Connessione*: i pixel che appartengono a regioni adiacenti se presi insieme non soddisfano la condizione precedente.

Esistono due approcci per la segmentazione di un'immagine:

- Suddivisione dei pixel in zone omogenee;
- Ricerca dei contorni – *edge detection*.

Si analizzano di seguito alcune tecniche classiche per la suddivisione di un'immagine.

5.12.4.1 – L'algoritmo *thresholding*

Si è detto in precedenza che per eseguire una operazione di *segmentazione* di un'immagine si devono marcare con un valore specifico ed univoco i pixel aventi una proprietà in comune.

L'algoritmo *thresholding* (di sfogliatura) ha lo scopo di dividere l'immagine in due zone: la figura e lo sfondo (background). Tale operazione viene eseguita in maniera molto semplice: dato un valore di soglia k associata ad un parametro scelto, divide i pixel dell'immagine in due insiemi, quelli con valore inferiore a k e quelli con valore superiore.

La segmentazione per sogliatura dipende fortemente dal contrasto presente in un'immagine, per esempio se si deve riconoscere un cubo bianco su di un pavimento bianco, sia l'uomo sia il *SV* avrebbero notevoli difficoltà perché il confine che delimita la fine di un oggetto (il cubo) con l'inizio di un altro (il pavimento) risulta molto flebile, cosa invece che non accadrebbe se il colore del cubo fosse per esempio nero.

Affinché questo algoritmo risulti robusto, è meglio lasciare all'algoritmo stesso la scelta del valore di confine k , ma, ovviamente, ci si chiede come si fa a far scegliere questo valore all'algoritmo stesso.

Uno dei metodi utilizzati sfrutta le informazioni che l'istogramma dell'immagine può fornire. Una volta ricavato l'istogramma si impone come soglia il valore medio che divide in due parti uguali l'istogramma. Può capitare che un istogramma abbia più picchi di intensità ed in questo caso le operazioni da compiere sono leggermente più complesse. Come prima cosa si divide l'immagine in zone tali che gli istogrammi appartenenti a tali zone abbiano un solo picco e, successivamente, si lavora su queste singole parti di immagini procedendo come nel caso precedente.

Nel caso di *backlighting* (illuminazione dal fondo) risulta più facile trovare la soglia di divisione.

5.12.4.2 – L'algoritmo *split and merge*

Si consideri nuovamente un'immagine digitale che deve essere suddivisa in regioni. L'algoritmo *split and merge* ci permette di suddividere iterativamente un'immagine in regioni che hanno in comune alcune caratteristiche.

Si indichi con **I** l'immagine di partenza, come mostrato nella Figura 2.20. Si supponga che non tutti i pixel dell'immagine **I** siano simili. L'algoritmo *split and merge* genera una prima suddivisione in regioni chiamate **I**₁, **I**₂, **I**₃, ed **I**₄, e si suppone poi che **I**₁, **I**₂, **I**₃, siano caratterizzate da pixel simili mentre lo stesso discorso non vale per **I**₄. A questo punto l'algoritmo genera un'ulteriore suddivisione dividendo l'immagine **I**₄ in quattro regioni. Si supponga, a questo punto, che solo le regioni **I**₄₃ e **I**₄₄ siano simili, allora l'algoritmo le trasformerà in una unica regione accorpata.

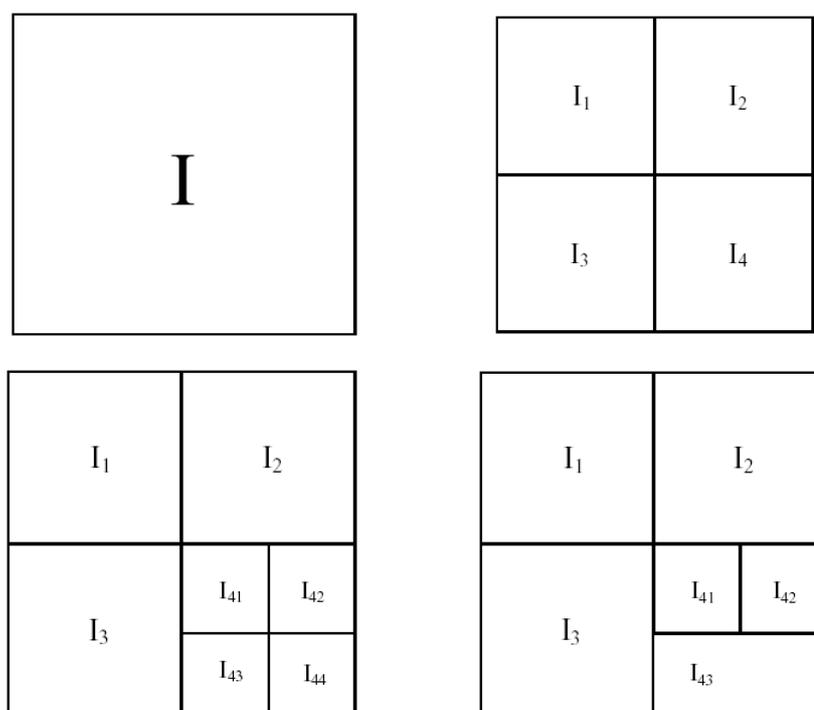


Figura 2.20 – Rappresentazione grafica dell'algoritmo *split e merge*.

Per evidenziare l'aspetto ricorsivo dell'algoritmo è possibile rappresentare il suo svolgimento con una struttura ad albero:

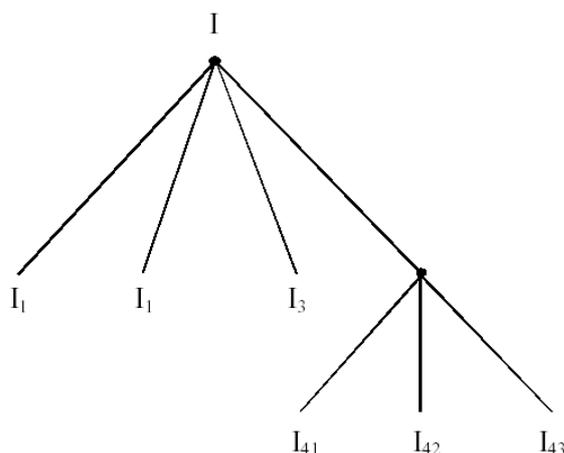


Figura 5.21 - Andamento del processo di divisione in regioni dell'immagine originaria

5.12.4.3 – L'algoritmo *region growing*

L'approccio con il metodo di *region growing* opera in modo opposto rispetto all'approccio con metodo *split and merge*.

Con l'utilizzo di questo algoritmo, dapprima viene formato un insieme iniziale di piccole aree raggruppate in funzione delle loro caratteristiche, poi si comincia scegliendo un *pixel seme* arbitrario che viene comparato con i pixel vicini. A questo punto la regione di crescita relativa a questo pixel seme viene formata aggiungendo all'insieme i pixel che risultano essere simili a quello di partenza. Quando l'allargamento della regione si ferma si sceglie un'altro pixel seme che non sia stato ancora considerato in nessuna regione già controllata. Questo processo continua fino a quando non è stata coperta tutta l'immagine.

L'algoritmo *region growing* solitamente porta ad una buona segmentazione dell'immagine ed è molto utile nell'edge detection.

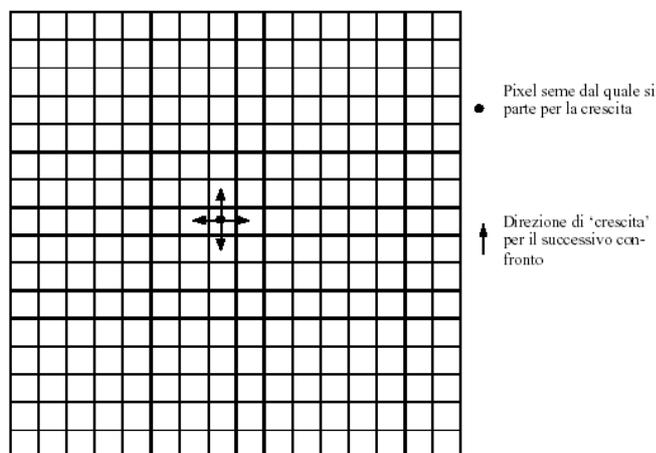


Figura 5.21 – Esempio di come parte la ricerca della regione

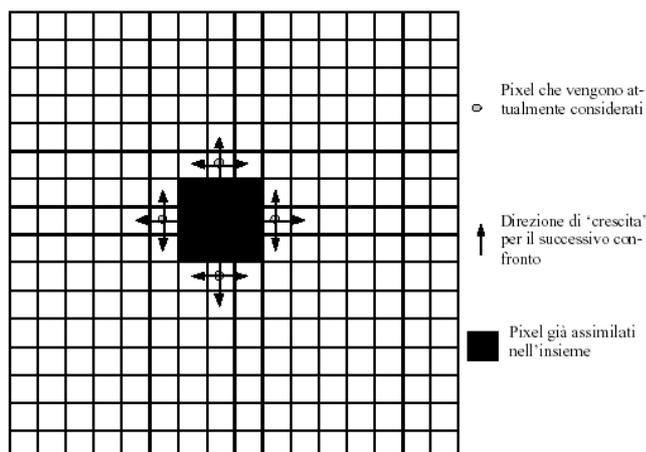


Figura 5.22 – Esempio di come prosegue la ricerca della regione

Anche in questo caso è difficile, pur essendo possibile, personalizzare l'algoritmo, infatti partendo da pixel particolari e forzando l'espansione della regione, pur influenzando il processo di segmentazione in favore dell'area che per prima viene coperta, è facile introdurre alcuni effetti indesiderati di seguito esposti:

- La regione che si sta espandendo domina il processo di region growing e alcuni edge di regioni adiacenti non vengono risolti correttamente;
- Scelte differenti di pixel di partenza portano a differenti stati di segmentazione;
- Ci possono essere dei problemi di risoluzione se vengono scelti pixels su linee di edge.

Per ovviare a questi inconvenienti è stata studiata una procedura leggermente diversa che si basa sempre sul region growing. Questo approccio è chiamato *simultaneous region growing*.

5.12.4.4 – L’algoritmo *simultaneous region growing*

Con l’utilizzo dell’algoritmo *simultaneous region growing* si tiene conto delle regioni adiacenti e dei problemi che esse possono generare. Infatti la *simultaneous region growing* permette una elaborazione parallela delle regioni accorpando in regioni uniche quelle regioni che presentano caratteristiche analoghe. Non viene permesso ad un processo di growing di dominare l’intera procedura e viene stabilito un limite sulle regioni che possono essere elaborate contemporaneamente. Una implementazione su sistemi di calcolo “paralleli” può portare ad un aumento sostanziale delle prestazioni.

5.12.5 – L’edge detection

Con l’Edge detection è possibile riconoscere i bordi di un oggetto all’interno di un immagine. L’idea base che sostiene gli algoritmi di ricerca dei bordi di oggetti all’interno di un immagine è racchiusa nel principio che in un immagine

ogni oggetto apporta dei cambiamenti locali. Questi cambiamenti delle proprietà di ogni pixel sono molto netti e coinvolgono quelli che fanno parte dei contorni. Quindi il contorno in un'immagine risulta essere un cambio locale e significativo nell'intensità dei pixel.

Esistono vari tipi di discontinuità:

- **Step discontinuities** (discontinuità ad un passo) cioè si ha un cambiamento repentino del valore dell'intensità dei pixel. Si immagina, per esempio, una piastra nera su sfondo bianco: se si scorre l'immagine da sinistra a destra, ad un certo punto si noterà un salto nell'intensità dei pixels e questo salto permarrà fin quando la piastra non finisce. Si ha appunto un salto nell'intensità di colore dei pixels come mostrato nella Figura 2.23.

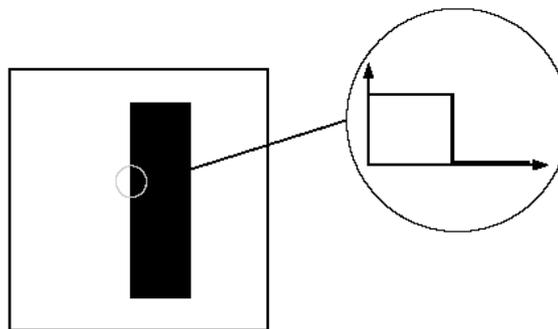


Figura 5.23 – Graficando l'andamento dell'intensità si ha un salto

- **Line discontinuities** dove si ha un repentino cambio di valore dell'intensità ma si ritorna al valore precedente dopo una breve distanza. Si può immaginare un filo nero (un graffio) su di uno sfondo bianco, se si scorre l'immagine da sinistra a destra si otterrà un salto nell'intensità del pixels ma subito dopo (pochi pixels dopo)

si ritornerà al valore che contraddistingue lo sfondo. Si ha appunto una linea all'interno dell'immagine, come mostrato nella Figura 2.24.

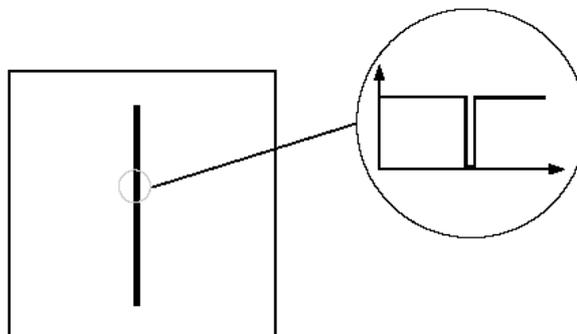


Figura 5.24 – Graficando l'andamento dell'intensità si ha un salto ma si ritorna quasi subito al valore iniziale

Bisogna comunque dire che sia lo *step discontinuities* che il *sine discontinuities* risultano essere casi rari nella realtà, poiché, pochi oggetti apportano questo tipo di cambiamento all'interno di un immagine.

- ***Line and roof edge*** dove il cambio di intensità degli oggetti che compongono l'immagine risulta essere graduale. Ciò significa che il confine di un oggetto può confondersi con lo sfondo, per esempio potrebbe essere poco illuminato, o il colore dell'oggetto è molto simile a quello che gli sta attorno, o per altri motivi ancora, ma man mano che si scansiona l'immagine la distinzione con lo sfondo si fa sempre più netta e ad un certo punto il divario diviene così sensibile che l'algoritmo rileva un confine, anche se in realtà il confine dell'oggetto era già stato superato, come mostrato nella Figura 2.25. Questo fatto può portare a male interpretazioni di ciò che l'immagine contiene.

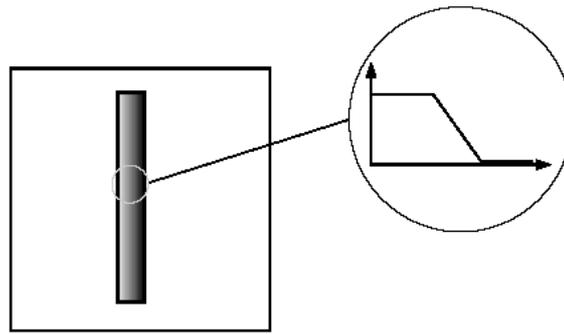


Figura 5.25 – Graficando l'andamento dell'intensità si ha una rampa in discesa

- **Roof edge** che è un caso molto simile al precedente se non per il fatto che non si raggiunge il valore di soglia che fa rilevare il confine, ma arrivato in prossimità di esso si ha un'inversione di intensità nei pixel e man mano che si avvanza nella scansione si ritorna ai valori dello sfondo come mostrato nella Figura 2.26.

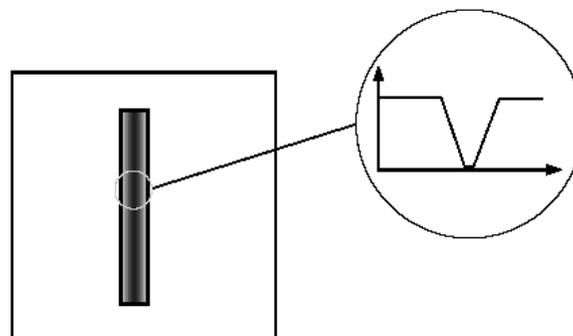


Figura 5.26 – Graficando l'andamento dell'intensità si ha una rampa in discesa subito seguita da una in salita

Si riportano nella Figura 2.27 alcuni esempi di andamenti delle intensità di confine che possono presentarsi durante l'analisi di immagini.

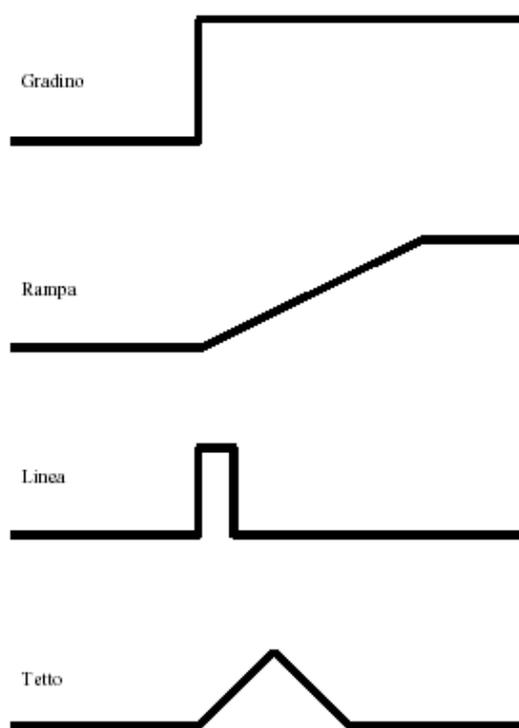


Figura 5.27 – alcuni esempi di andamenti delle intensità di confine che possono presentarsi durante l’analisi di immagini

5.12.6 - Operatori morfologici

Le trasformazioni morfologiche derivano il loro nome dalle azioni principali che compiono, che modificano la forma di un oggetto.

In molte applicazioni per la visione artificiale (AV), per implementare un algoritmo che possa intervenire e modificare un oggetto, risulta essere più naturale considerarne la “forma”.

La base fondamentale dell’approccio morfologico, nello studio ed elaborazione delle informazioni visive, è l’immagine binaria.

L’*intersezione* di due immagini binarie A e B, ($A \cap B$) è un’immagine binaria rappresentata da tutti i pixel che risultano appartenere sia ad A sia a B.

L'*unione* di A e B ($A \cup B$) è l'insieme di pixel presenti in almeno una delle due immagini.

Il vettore somma di due pixel $p[i,j]$ e $q[k,l]$ è il pixel $(p+q)$ in posizione $[i+k,j+l]$.

Il vettore differenza di due pixel $p[i,j]$ e $q[k,l]$ è il pixel $(p-q)$ in posizione $[i-k,j-l]$.

Applicando ora queste funzioni ad un'immagine è possibile ottenere alcuni algoritmi. Nella Figura 2.28 sono mostrate rispettivamente: la Figura 2.28A (la più grande) sulla quale saranno applicati i vari operatori morfologici, la Figura 2.28B (la più piccola) che funge da maschera. Il centro della figura 2.28B sarà preso come pixel di riferimento per gli operatori, ciò significa che quando saranno applicati questo pixel scorrerà l'intera figura senza uscire da essa.

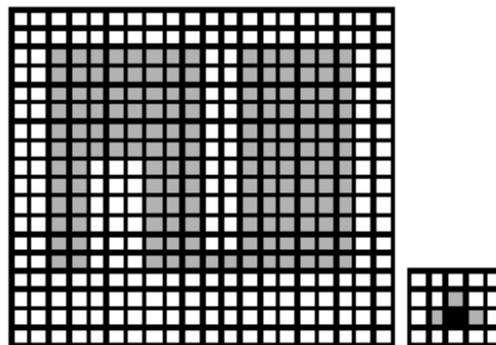


Figura 5.28 – Esempi di immagini originali A e B

Si riporta inoltre in Figura 2.29 un esempio di come è applicata l'immagine B sull'immagine A

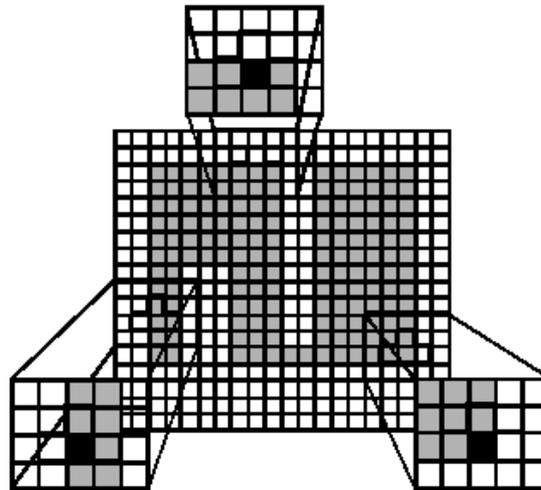


Figura 5.29 - Esempio di come è applicata l'immagine B sulla A

5.12.6.1 – L'operatore *dilation*

L'operatore *dilation* (dilatazione) non fa altro che prendere i pixel dell'immagine originaria e metterli in *or* logico con i pixel presenti nella maschera. Questa operazione è svolta su tutta l'immagine e viene così scritta:

$$A \oplus B = \bigcup_{b_i \in B} A_{b_i} \quad (2-69)$$

Questa funzione gode della proprietà associativa e commutativa, e quindi, l'ordine con il quale si opera non è particolarmente importante. Ciò vuol dire che posso considerare sia l'immagine A che la B come se fossero o l'originale o la maschera.

Nella Figura 2.30 si riporta l'immagine dopo l'applicazione dell'operatore *dilation*.

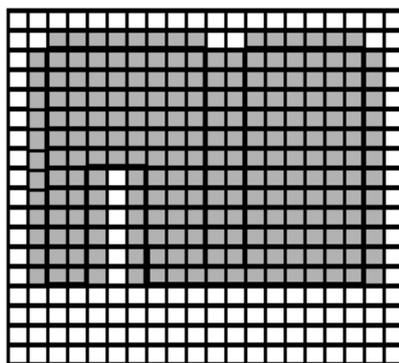


Figura 5.30 – Rappresentazione dell'immagine dopo l'applicazione dell'operatore *dilation*

5.12.6.2 – L'operatore *erosion*

L'operatore *erosion* (erosione) può essere considerato l'opposto dell'operatore *dilation*.

L'operatore di *erosion*, infatti, lascia inalterati quei pixel risultanti da un'operazione di *and* logico tra l'immagine originale e maschera. Questa operazione si scrive con:

$$A \oplus B = \{p \mid B_p \subseteq A\} \quad (2-70)$$

Anche questo operatore gode della proprietà commutativa.

Si riporta anche in questo caso, nella Figura 2.31, l'immagine dopo l'applicazione dell'operatore *erosion*.

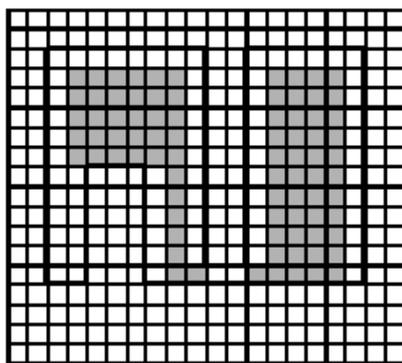


Figura 5.31 – Rappresentazione dell'immagine dopo l'applicazione dell'operatore *erosion*

Erosione e dilatazione sono spesso usati per filtrare le immagini tanto che, se la natura del rumore percepito durante l'acquisizione dell'immagine è conosciuta, è possibile applicarne una sequenza predefinita in maniera tale da poterlo eliminare.

Le operazioni basilari della matematica morfologica si possono combinare in complesse sequenze. Per esempio un'erosione seguita da una dilatazione utilizzando la stessa figura di prova rimuoverà tutti i pixel dell'immagine stessa che saranno contenuti in una piccola regione mentre lascerà inalterati i restanti. Questa sequenza è chiamata *opening*, e nella Figura 2.32 è riportato il risultato di questa sequenza applicata alla figura A con l'ausilio della maschera B.

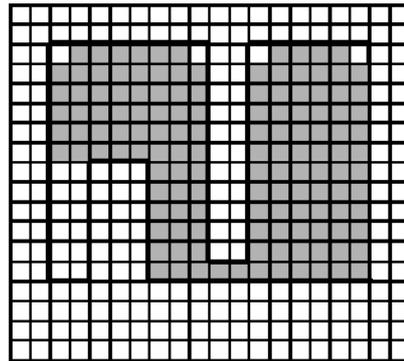


Figura 5.32 – Risultato della sequenza *opening* applicata alla figura A con l'ausilio della maschera B

La sequenza opposta a quella appena descritta, cioè dilatazione seguita da erosione riempirà i buchi e le concavità più piccole dell'immagine di prova. Quest'altra sequenza si chiama *closing* e nella Figura 2.33 è riportato il risultato di questa sequenza applicata alla figura A con l'ausilio della maschera B.

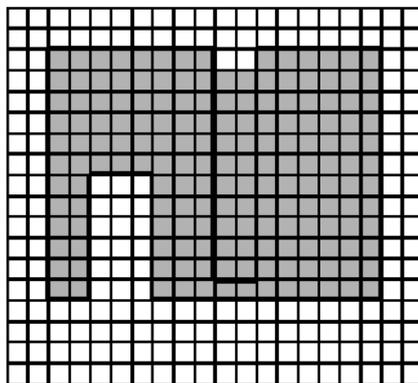


Figura 5.33 – Risultato della sequenza *closing* applicata alla figura A con l'ausilio della maschera B

5.13 - Sistemi lineari e filtri

Un *filtro* lo si può immaginare come una sorta di scatola che accetta qualcosa in ingresso e ne restituisce un'altra in uscita. L'operazione più comune compiuta da un filtro è l'eliminazione di una parte del contenuto dell'oggetto che ha ricevuto in ingresso. L'oggetto in ingresso può essere molte cose: acqua, luce, suoni e immagini digitali. La maggior parte delle volte il filtro cerca di eliminare delle impurità che si sono aggiunte all'oggetto che esamina: nel caso dell'acqua potrebbe essere della terra, nel caso di immagini digitali invece cercherà di eliminare del rumore aggiuntosi durante il processo di acquisizione, come mostrato nella Figura 2.34.

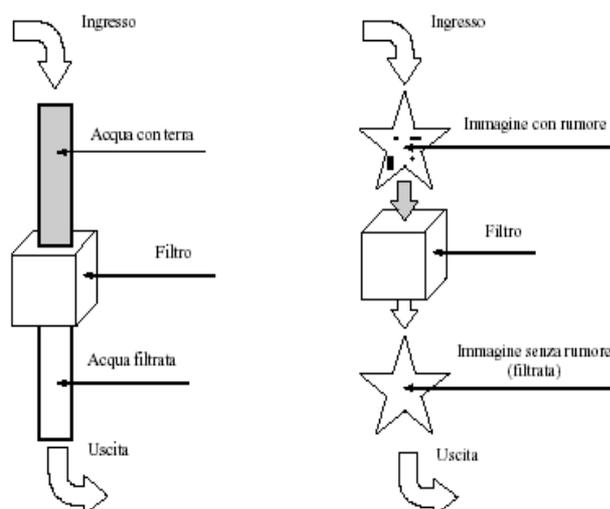


Figura 5.34 – Esempio di filtro per acqua e per immagini

Un filtro può avere diverse caratteristiche, esso può essere:

- **Lineare**: analiticamente significa che si moltiplica per una costante l'ingresso si ottiene un'uscita che è anch'essa moltiplicata per la stessa costante, come rappresentato nella Figura 2.35.

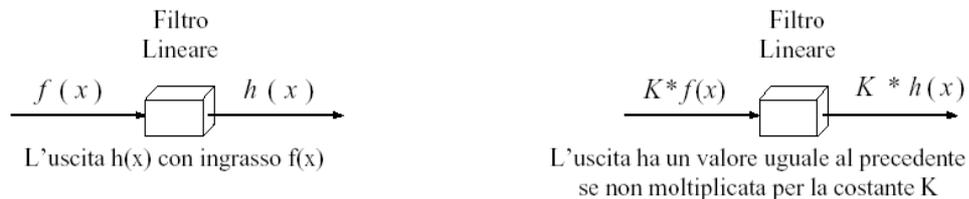


Figura 2.35 – Esempio di filtro lineare

Trattando di immagini significa che se si ingrandisce/diminuisce un'immagine l'effetto del filtro non varia.

- **Tempo invariante**: significa che se il filtro viene applicato in tempi diversi a un oggetto il risultato che si ottiene è lo stesso, ovviamente in tempi diversi
- **Spazio invariante**: questa proprietà si traduce nel fatto che se si applica un filtro ad un'immagine scandendola da punti diversi si ottiene sempre lo stesso risultato
- **Tempo/spazio continuo/discreto**: queste coppie di proprietà, che possono combinarsi le une con le altre indicano appunto che il filtro può agire su tempo o spazio dell'oggetto in esame e che questi ultimi possono essere continui o discreti.

Le immagini digitali sono oggetti spaziali discreti, cioè nel piano x,y che le contiene (spazio), esiste una discretizzazione lungo gli assi cartesiani, ovvero questi ultimi vengono divisi in passi di dimensione uguale a quella dei pixel. Nella Figura 2.36 è riportato un esempio di discretizzazione spaziale.

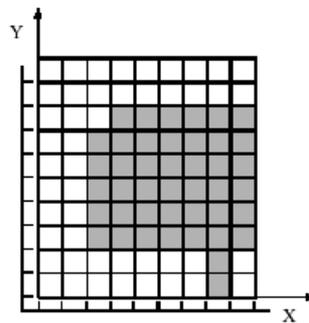


Figura 5.36 – Esempio di discretizzazione spaziale

Ora, senza perdere in generalità, si può affermare che l'uscita di un filtro lineare a tempo continuo e spazio discreto che viene applicato ad un'immagine da come risultato la seguente espressione:

$$h[i, j] = A * p_1 + B * p_2 + C * p_3 + D * p_4 + E * p_5 + F * p_6 + G * p_7 + H * p_8 + I * p_9 \quad (2-71)$$

dove $h[i, j]$ è il valore che il pixel assume dopo che il filtro gli è stato applicato.

Nel caso specifico della visione si può immaginare i valori A, B, C, \dots, I come valori costanti di una matrice il cui centro, scorre pixel dopo pixel su tutta l'immagine, mentre i valori $p_1, p_2, p_3, \dots, p_9$ sono i valori dei pixel dell'immagine adiacenti al pixel filtrato (si veda la Figura 2.37).

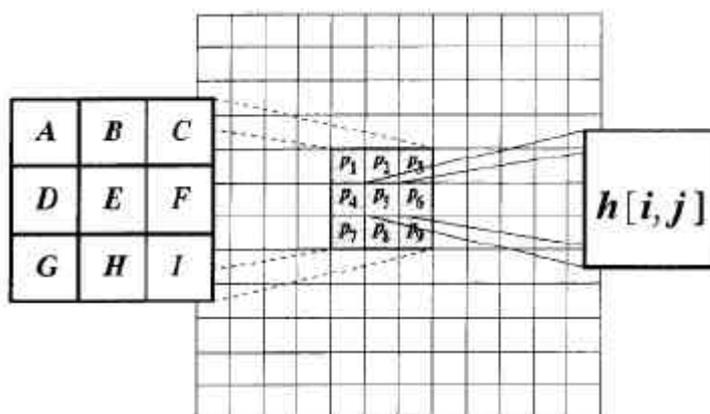


Figura 5.37 – Applicazione su un immagine di un filtro lineare a tempo continuo e spazio discreto

Cosa molto importante è che ogni filtro ha una matrice che lo caratterizza e viceversa, cosicché è sufficiente variare i valori presenti in essa per cambiare il filtro adottato e non solo, infatti essendo la banda passante dipendente dalla dimensione della matrice, si può aumentare quest'ultima ottenendo una banda maggiore, ossia invece che una matrice 3x3 si può usare una 4x4 o 5x5 e così via.

5.13.1 – Filtri lineari

Spesso si ha la necessità di filtrare le immagini perché durante la loro acquisizione viene a sommarsi del rumore, oppure perché interessa evidenziarne alcune caratteristiche.

I più classici e tipici casi di rumore sono quello *granuloso*, *impulsivo* e *gaussiano*. Il primo apporta granuli di pixel bianchi o neri, il secondo apporta solo valori impulsivi bianchi, mentre il terzo apporta una variazione gaussiana

all'intensità di tutti i pixel che compongono l'immagine. Un esempio della presenza dei tre tipi di rumori sopra citati sono riportati nella Figura 2.38.



Figura 5.38 – In sequenza da sinistra a destra è riportata l'immagine originale e quella con rumore *granuloso monocromatico* e con rumore *gaussiano monocromatico*.

5.13.2 – Smoothing filter

Lo *smoothing filter* risulta essere molto efficace quando ci si trova di fronte alla presenza di rumore di tipo gaussiano, ma può essere usato anche per gli altri tipi di rumore.

Un filtro lineare è implementato facendo la somma pesata dei pixel adiacenti, come mostrato in Figura 2.39, e questo vuol dire che è possibile adottare le maschere di convoluzione viste prima.

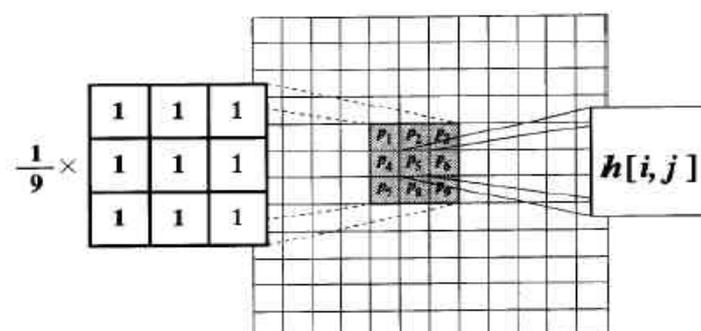


Figura 5.39 – Esempio di applicazione dello smoothing filter

Bisogna precisare che se un filtro non esegue la somma pesata del valore dei pixel risulta essere un filtro non lineare.

Un esempio di filtro spazio invariante ma non lineare è il filtro mediano (anche questo adoperato per le nostre applicazioni)

5.13.3 – Mean filter

Il mean filter somma il valore dei pixels adiacenti a quello preso in esame per poi dividere per il totale dei pixels utilizzati. La formula che lo definisce è :

$$h[i, j] = \frac{1}{M} \sum_{(k,l) \in N} f[k, l] \quad (2-72)$$

dove $h[i, j]$, rappresenta il nuovo valore del pixel mentre i valori $f[k, l]$, sono i valori dei pixels adiacenti a quello filtrato.

Per esempio se si avesse una maschera 3x3.

$$h[i, j] = \frac{1}{9} \sum_{k=i-1}^{i+1} \sum_{l=j-1}^{j+1} f[k, l] \quad (2-73)$$

Nella Figura 2.40 è possibile notare la differenza tra l'immagine originale (prima immagine a sinistra) e la stessa con l'aggiunta di un disturbo gaussiano (seconda immagine) ed infine quelle filtrate con un *mean filter* rispettivamente 3x3 e 5x5 (terza e quarta immagine).



Figura 5.40 - Immagine originale (prima immagine a sinistra); la stessa immagine con l'aggiunta di un disturbo gaussiano (seconda immagine); ed infine quelle filtrate con un *mean filter* rispettivamente 3x3 e 5x5 (terza e quarta immagine).

E' possibile adottare anche altri valori per gli elementi della matrice (kernel), l'importante è che la somma dia 1.

5.13.4 – Filtro mediano

Il filtro mediano opera secondo una logica abbastanza semplice: raccoglie in una lista tutti i valori dei pixel interessati della matrice ponendoli in ordine crescente, e, successivamente assegna al pixel in esame il valore che si trova a metà della lista stessa. Nell'esempio in Figura 2.41 38 è il valore che si trova a metà lista (cioè il mediano) ed è quello che viene assegnato al pixel filtrato.

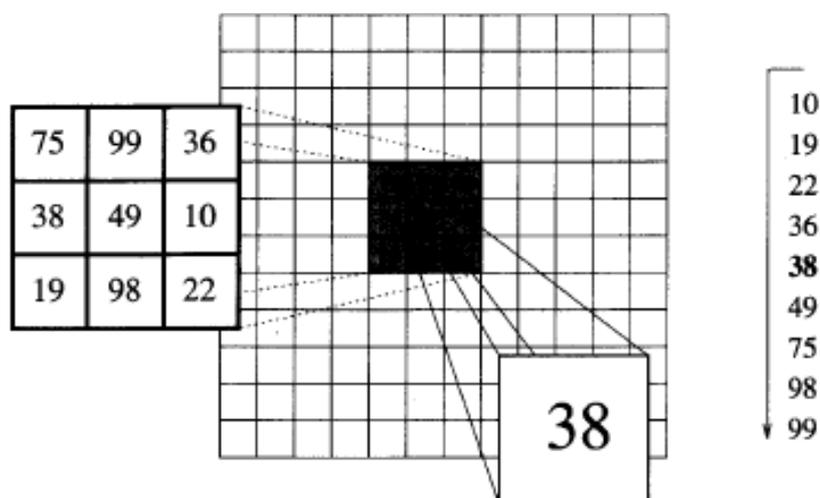


Figura 5.41 – 38 è il valore mediano della lista di valori ed è quello assegnato al pixel in esame

5.13.5 – Filtro gaussiano

Il filtro gaussiano come dice il nome stesso si basa sulla distribuzione gaussiana (Figura 2.42). Questa è data dalla formula in due dimensioni:

$$g[i, j] = e^{-\frac{(i^2 + j^2)}{2\sigma^2}} \quad (2-74)$$

Dove i e j sono lo scostamento dal valore 0 mentre σ è la varianza rispetto allo 0.

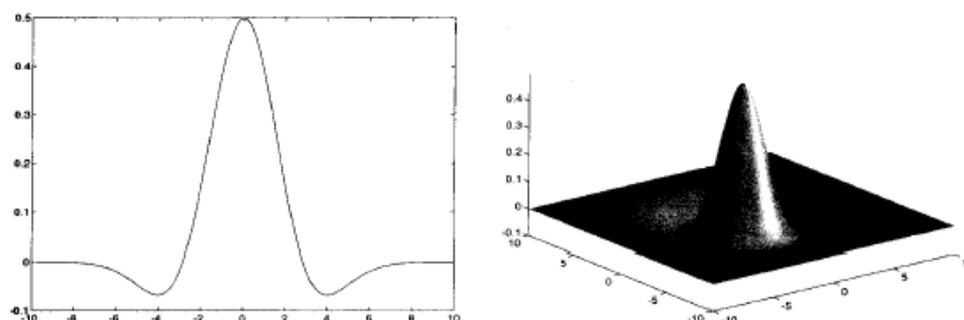


Figura 5.42 – Distribuzione gaussiana

Le proprietà principali di questo filtro sono cinque:

1. La funzione gaussiana in due dimensioni risulta essere totalmente simmetrica, questo vuol dire che è ininfluente la direzione verso la quale si applica il filtro, dunque la presenza di bordi di un oggetto del quale non si conosce l'orientamento con influenza l'applicazione del filtro.
2. La funzione gaussiana ha un solo massimo e decresce monotonicamente verso gli estremi tendendo ad azzerarsi.
3. La sua trasformata di Fourier è ancora una gaussiana perciò ha la proprietà del punto 2.
4. Potendo normalizzare la funzione gaussiana attraverso il parametro σ si può modificare il valore del picco.
5. La funzione gaussiana in R^2 è il risultato di un'operazione matematica chiamata *convoluzione in due dimensioni di due gaussiane* e questo porta a semplificare i calcoli perché è possibile ottenere la matrice del filtro semplicemente convolvendo i due vettori riga che rappresentano l'andamento di ogni singola gaussiana in ciascuna dimensione.

5.13.6 – Size filter

Per ricavare alcune informazioni da un'immagine a volte si utilizza un semplice algoritmo di "soglia". Il *size filter* è appunto un esempio di questi algoritmi. Spesso succede che durante l'acquisizione oltre all'immagine originaria viene acquisito anche del rumore. Questo rumore, rispetto all'immagine, aggiunge un numero casuale ma limitato di pixels e per rimuoverli è sufficiente far sì che l'algoritmo che elabora l'immagine ricerchi in quest'ultima delle figure contenenti un numero minore o uguale a k pixels, dove k è una soglia prefissata, e, una volta selezionate, li elimini. Chiaramente occorre fare molta attenzione quando si pone il

valore di soglia perché può accadere che se viene fissato troppo alto vengano tolti particolari che in realtà appartenevano all'immagine originaria.

Nella Figura 2.43 si può osservare come agisce il *size filter* con k uguale a 12. Se si fosse utilizzato k uguale a 22 si sarebbe perso anche il puntino della *i* poiché occupa 21 pixel.

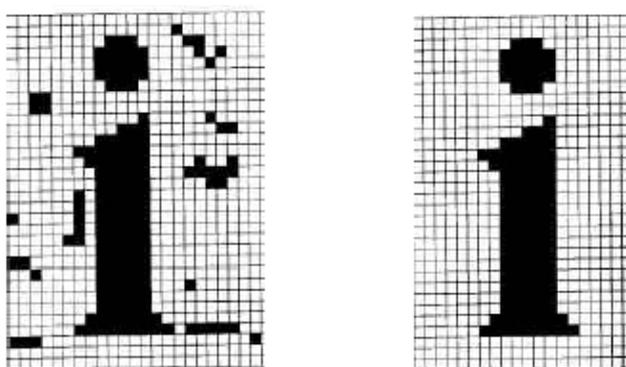


Figura 5.43 – Esempio di applicazione del *size filter*: le zone che contengono un numero di pixel inferiore ad una certa soglia k vengono eliminate.

Naturalmente la soglia k può riguardare anche altri parametri quali il colore la luminosità ecc e non solo il numero di pixels contenuti in una regione chiusa.

5.14 – Misura dell'Informazione di un Template

Per l'analisi delle immagini i sistemi di visione in pratica lavorano secondo una sorta di criterio di similitudine, ossia scelto uno o più template (ritagli di immagini di riferimento) che più o meno si ripetono nei vari fotogrammi in cui viene spaccettata l'acquisizione video (anche quando questo avviene in real-time), l'algoritmo calcola le corrispondenze che si presentano tra tale template ed

il fotogramma catturato al momento. Tale operazione di calcolo, può poi essere snellita selezionando nell'inquadratura una regione di interesse, chiamata comunemente **ROI**, regione più o meno grande nella quale si vuol far avvenire la ricerca del simil-template (da non confondere con Return Of Investment, termine di natura economica che prima o dopo entra sempre in gioco).

Non tutti i punti selezionabili in un'immagine sono buoni per la ricerca della corrispondenza, ad esempio, se si seleziona un punto su di una parete bianca è praticamente impossibile trovarne l'esatta corrispondenza nell'altra immagine in quanto, in linea di principio, qualsiasi punto della parete, o al più tutti i punti della parete che giacciono sulla retta epipolare associata al punto selezionato, sono ottimi candidati per il match (la ricerca) in quanto il coefficiente di correlazione sarà prossimo ad 1 per ciascuno di essi.

Un punto deve essere sufficientemente distinguibile dal suo intorno per poter essere un buon template per la corrispondenza, ovvero il template associato (una finestra rettangolare centrata nel punto selezionato) deve contenere sufficiente informazione.

5.14.1 – Tracking

Una buona misura dell'informazione contenuta in una finestra si può estrapolare dall'algoritmo di Tomasi e Kanade. Nell'ambito della problematica di *tracking*, ossia l'inseguimento di un punto che si muove durante la sequenze di immagini, Tomasi e Kanade hanno reputato necessario introdurre il concetto di *feature buona*, nel senso che fosse facilmente inseguibile attraverso i vari fotogrammi. Solitamente in letteratura si considera una nozione a priori sulla bontà di una feature, indipendente dal metodo utilizzato per inseguirle: si

considerano buone feature solitamente i punti associati ad angoli, bordi, ecc. Come per la corrispondenza, neppure il tracking si può fare su semplici punti, ma si fa piuttosto usando delle finestre. Quello che si cerca è un modo per vedere se una finestra contiene sufficiente variazione di intensità (texture).

Si può supporre che tra due frame successivi l'immagine cambi poco, e quindi detta I l'immagine all'istante t e J quella al tempo $t+1$, quest'ultima può essere modellata con un semplice modello lineare:

$$J(y) = I(x-d) = I(x) - g * s \quad (2-75)$$

$$g = \nabla I(x) \quad (2-76)$$

come lo sviluppo in serie di Taylor troncato al primo ordine e centrato in x di $I(x)$.

In tal modo il problema di tracking si riduce a trovare il piazzamento bidimensionale s , che minimizza in norma quadratica la distanza tra J e il modello. La soluzione è data dal vettore d che risolve il sistema lineare di due equazioni in due incognite:

$$Gs=e \quad (2-77)$$

Con

$$G = \int_{w \in W} g * g^T * w * dW \quad e \quad e = \int_{w \in W} (I - J) g * w * dW \quad (2-78)$$

dove gli integrali sono calcolati su di una finestra W , centrata in x .

Affinché la soluzione delle equazioni sopra elencate sia stabile numericamente la matrice simmetrica G deve essere ben condizionata e i suoi coefficienti devono essere sufficientemente grandi rispetto al rumore sovrapposto all'immagine.

Le suddette richieste su G si traducono nel *criterio di selezione delle feature buone*, ovvero si considerano buone feature quelle per cui il sistema è ben condizionato.

Dal punto di vista pratico queste condizioni sono equivalenti a richiedere che i due autovalori di G siano sufficientemente grandi (robustezza rispetto al rumore) e non troppo diversi (buon condizionamento numerico). Poiché l'intensità di un'immagine è un segnale ad ampiezza limitata, generalmente quando l'autovalore minore di G è sufficientemente grande, G è anche ben condizionata. Quindi, detti λ_1 e λ_2 i due autovalori di G , una finestra contiene sufficiente informazione, ovvero ne può essere fatto facilmente il tracking oppure, la corrispondenza, se:

$$\min(\lambda_1, \lambda_2) > \lambda$$

la soglia λ si può scegliere come valore medio tra gli autovalori misurati in una zona a colorazione uniforme ed una ad elevata tessitura.

5.14.2 – L'algoritmo di Tomasi-Kanade per il problema della corrispondenza

Si supponga di aver selezionato un punto m in una delle immagini. Si vuole determinare se di tale punto se ne può fare agevolmente la corrispondenza. Per quanto detto, ciò è equivalente al fatto che l'autovalore minimo della matrice G calcolata in un intorno W del punto sia sufficientemente maggiore della soglia λ . In realtà piuttosto di concentrarsi sul solo punto m appena selezionato, conviene considerare un intorno X di tale punto e controllare se gli altri punti contenuti in X soddisfano la condizione, magari in maniera migliore di m .

Si considera quindi una finestra rettangolare X centrata nel punto m , di dimensione $k \times k$. Per ognuno dei punti $m_{ij} \in X$ con $i, j = -k/2, \dots, k/2$ si calcola la matrice G_{ij} su di una finestra W di dimensione $s \times s$, con $s < k$. Di ognuna delle G_{ij} si calcola l'autovalore minimo esprimibile in forma chiusa in funzione degli elementi di G :

$$\lambda_{\min} \frac{1}{2} \left\{ g_{11} + g_{22} - \sqrt{(g_{11} - g_{22})^2 + 4g_{12}^2} \right\} \quad (2-79)$$

e lo si seleziona come migliore punto del quale cercare la corrispondenza il punto m_{ij} , per il quale il corrispondente autovalore minimo λ_{\min} di G_{ij} è massimo tra quelli maggiori della soglia λ . Se nessuno dei punti X soddisfa al criterio di selezione, prima di marcare il punto come non adatto alla corrispondenza, è possibile usare una delle seguenti alternative:

- si può aumentare la dimensione della finestra X e ripetere il processo di selezione;

- si può sottocampionare l'immagine di partenza e ripetere il processo di selezione su un intorno X di m della stessa dimensione di X .

La prima tecnica, se ripetuta molte volte, può diventare piuttosto costosa in termini di tempo di esecuzione, e risulta quindi preferibile la seconda, anche se può portare alla selezione di punti piuttosto distanti da m . Ma di questo si può eventualmente tenerne conto limitando la distanza tra m ed il punto effettivamente selezionato per la ricerca della corrispondenza.

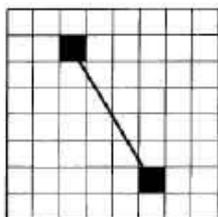
5.14.3 – La distanza

In molte applicazioni è necessario conoscere la distanza tra due pixels o tra due figure in un'immagine. Tuttora non è stato definito un metodo unico per misurare tale distanza in un'immagine digitale. Quindi è possibile farlo in diversi modi. In ogni caso per ogni situazione vi è un metodo che risulta essere migliore rispetto agli altri. Dati tre pixels p, q e r la distanza D gode di queste proprietà:

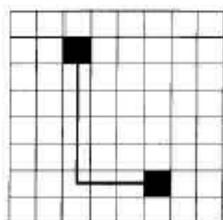
- $D(p, q) \geq 0$ e $D(p, q) = 0$ se e solo se $p=q$: cioè la distanza tra due punti è sempre una quantità positiva ed è nulla solo nel caso che i due punti abbiano coordinate equivalenti.
- $D(p, q) = D(q, p)$: cioè la distanza tra due punti non cambia invertendo il loro ordine.
- $D(p, r) \leq D(p, q) + D(q, r)$: cioè la distanza tra i punti p e r è minore od uguale alla somma delle distanze parziali che si possono calcolare introducendo un terzo punto q . Saranno uguali solo se il punto q giace sulla retta che passa per p e r .

Si hanno inoltre tre dei possibili modi per misurare la distanza tutti ricavabili da semplici equazioni geometriche:

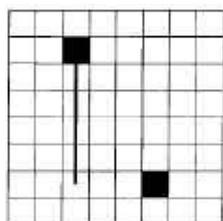
- Distanza euclidea



- Distanza di Manhattan



- Distanza scacchiera



6. TECNICHE DI CONTROLLO NELLA SALDATURA PER FUSIONE

6.1 – Introduzione

Come già affermato in precedenza, l'uso dei sistemi di visione nel mondo industriale risulta, ad oggi, ancora un'applicazione di nicchia, le cui potenzialità lasciano ampio spazio alla creatività dei progettisti.

È necessario, in prima istanza, esaminare lo *stato dell'arte* relativo ai sistemi di visione applicati ai processi di saldatura. Sarà così possibile offrire un resoconto sulla situazione attuale, nonché sulle conoscenze e sulle più importanti applicazioni industriali relative a questo argomento.

6.1.1 – La localizzazione del giunto attraverso lo studio dello spettro della luce emessa da una saldatura ad arco MIG

Un interessante studio è stato realizzato da G. Agapiou, C. Kasiouras, A.A. Serafetinides del Dipartimento di Fisica dell'Università di Atene (Grecia) riguardante l'analisi particolareggiata dello spettro della luce emessa da una saldatura ad arco MIG per lo sviluppo di un sensore per la localizzazione del giunto di saldatura. In tale studio sono state compiute, perciò, misurazioni dettagliate e analisi dello spettro prodotto dall'arco di saldatura dalla regione ultravioletta dello spettro (150 nm) alla regione vicina all'infrarosso (970 nm), rilevando la presenza di linee di emissione molto forti nello spettro. I risultati conseguiti sono di grande importanza per la realizzazione di un sistema ottico o di visione che lavora vicino ad un arco di saldatura, poiché la lunghezza d'onda del

sistema ottico può essere selezionata per lavorare vicino ad un valore dove lo spettro dell'arco provoca la minima interferenza alla luce laser.

Il metodo per localizzare il giunto utilizzato in questo studio è quello di usare un laser a diodo dotato di un specchio di scansione e analizzare il giunto. Il sensore è una videocamera CCD lineare che analizza il movimento dello spot del laser sul metallo e misura l'angolo tra il suo asse e la linea dallo spot al centro della sua lente. L'angolo del raggio laser iniziale con l'asse del sensore è già conosciuto dalla posizione angolare dell'analizzatore. Basandosi su due angoli noti, uno dal centro dell'analizzatore allo spot del laser, e l'altro dal centro della lente della telecamera allo spot del laser, come si vede in Figura 4.1, è possibile, usando il metodo della triangolazione, trovare la distanza esatta dello spot del laser al sensore.

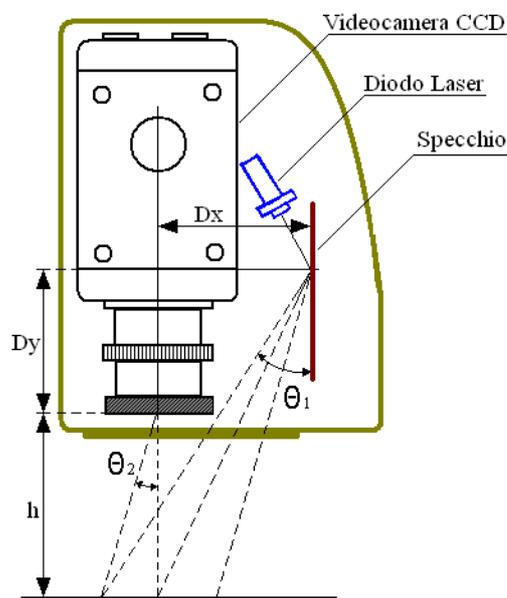


Figura 6.1 - Analizzatore laser costituito da un diodo laser, un specchio ed una videocamera CCD

Durante questi studi la testa del sensore, mostrata in Figura 4.1, è stata dotata di un laser a diodo che ha una potenza in uscita di 30 mW. Un meccanismo di scansione segue rapidamente il giunto di saldatura col raggio laser. La luce diffusa viene raccolta da una videocamera CCD lineare inclusa nella testa di sensore e che trasferisce i valori digitalizzati ad un personal computer.

Un filtro di interferenza di fronte al sensore CCD rende impraticabile la maggior parte della luce non desiderata dell'arco; per questo motivo l'intera testa del sensore è racchiusa ermeticamente in una scatola appositamente disegnata che resiste all'interferenza elettromagnetica e all'ambiente severo che si determina durante la saldatura. Lo specchio oscillante sul quale viene proiettato il raggio laser e che analizza la linea di giunzione è stato dotato di un encoder ottico che rileva la sua posizione. La frequenza di oscillazione è rilevabile attraverso un oscilloscopio ed è stata selezionata nell'intervallo di 5 ± 20 Hz. Per questo intervallo, la deviazione dello specchio è $\pm 10^\circ$ e ciò ha permesso di analizzare una larghezza del pezzo di 5 cm ai lati della linea di giunzione. L'equazione che calcola questa distanza dalla superficie del pezzo al sensore è la seguente:

$$h = \frac{D_x + D_y \cdot \operatorname{tg} \theta_2}{\operatorname{tg} \theta_1 - \operatorname{tg} \theta_2} \quad (1-1)$$

dove h è l'altezza misurata dal sensore. Il resto dei termini presenti nell'equazione è mostrato in Figura 4.1. Durante il processo descritto, lo scanner rileva il giunto, in modo da ottenere un profilo mono-dimensionale del giunto stesso.

6.1.2 – Lo studio di un sistema di tracciamento del giunto per una saldatura ad arco robotizzata

Altri importanti studi sono stati condotti da J. S. Kim, Y. T. Son, H. S. Cho e K. I. Koh del Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Korea Advanced Institute of Science & Technology.

L'obiettivo dello studio è stata la ricerca di un buon sistema di saldatura ad arco robotizzato con un sensore visivo per misurare le caratteristiche geometriche dettagliate del giunto che deve essere saldato, per poi realizzare una correzione del percorso del robot a partire dai risultati misurati. Queste correzioni sono necessarie per compensare eventuali imprecisioni tra gli elementi da saldare, nonché la non perfetta preparazione del bordo e le distorsioni termiche durante il processo di saldatura che rendono necessarie correzioni in tempo reale del percorso in modo da poter opportunamente pre-istruire il robot prima che cominci la saldatura. Inoltre, è necessario effettuare appropriati cambiamenti nei parametri di saldatura al fine di compensare ogni variazione nella geometria del giunto come il volume di riempimento ed il gap tra gli elementi da saldare.

Questo lavoro è quindi orientato ad assicurare la robustezza del sistema nei confronti delle variazioni nella configurazione del giunto, superare le imperfezioni e/o errori causati dai disturbi ottici, quali lo sfolgiorio dell'arco, gli schizzi ed i fumi di saldatura.

Nel sistema sviluppato, un robot con 6 gradi di libertà trasporta la torcia di saldatura ed il sensore di visione che inquadra il giunto davanti alla torcia. Le immagini provenienti dal sensore di visione sono analizzate da un sistema di elaborazione visivo, il quale calcola la posizione del giunto.

Al fine di compensare le variazioni tra i vari pezzi da lavorare o le variazioni della geometria del giunto, questo risultato di elaborazione è poi utilizzato nel modulo di controllo per correggere il percorso della torcia di saldatura.

Il sistema generale è composto da 2 moduli: un *ROBOT CONTROL MODULE*, ed un *VISION PROCESSING MODULE*, come mostrato in Figura 4.2.

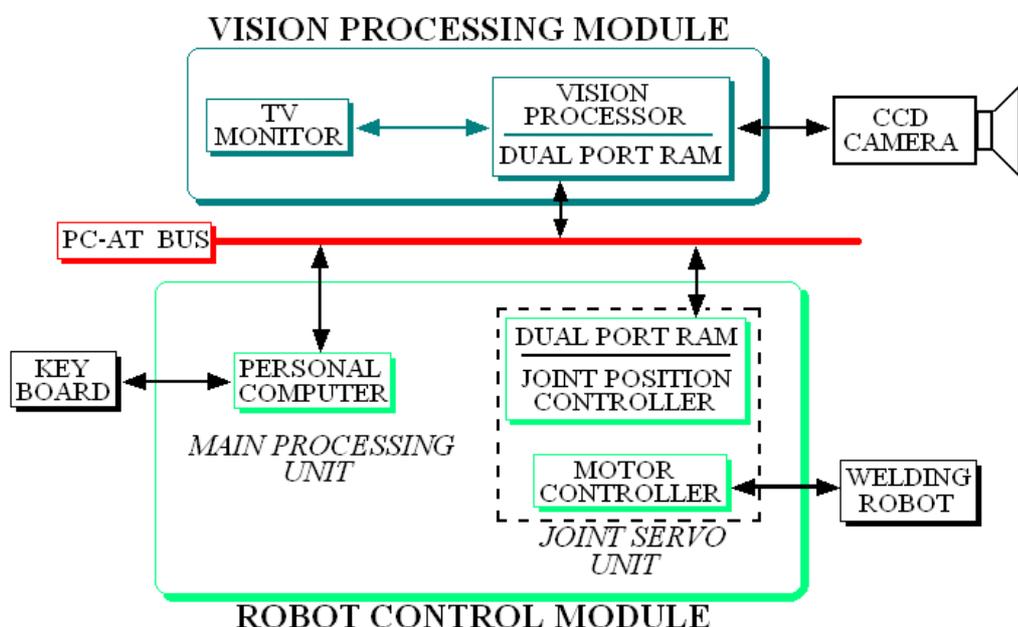


Figura 6.2 – Architettura del sistema hardware utilizzato

Il *ROBOT CONTROL MODULE* è a sua volta costituito da 2 unità:

- La *MAIN PROCESSING UNIT* che opera la maggior parte delle elaborazioni, come per esempio la trasformazione delle coordinate per il controllo della traiettoria in coordinate cartesiane, il controllo dei sensori feedback per il rilevamento del giunto, ed altro;

- La *JOINT SERVO UNIT* riceve il vettore di moto angolare con un periodo di campionatura di 16ms dalla *MAIN PROCESSING UNIT*.

Il *VISION PROCESSING MODULE* analizza l'immagine ottenuta dai sensori di visione per riconoscere il tipo di giunto saldato e calcolarne la posizione del centro. Questo modulo comunica con il *MAIN PROCESSING UNIT* attraverso una *PC-AT BUS*. Siccome l'individuazione del centro del giunto è fatta davanti alla torcia di saldatura, l'informazione ottenuta deve essere ritardata di un periodo di tempo tale da tener conto della percorrenza.

Il *sensore di visione* è costituito da una videocamera CCD e da un diodo laser che genera un raggio di luce come mostrato in Figura 4.3.

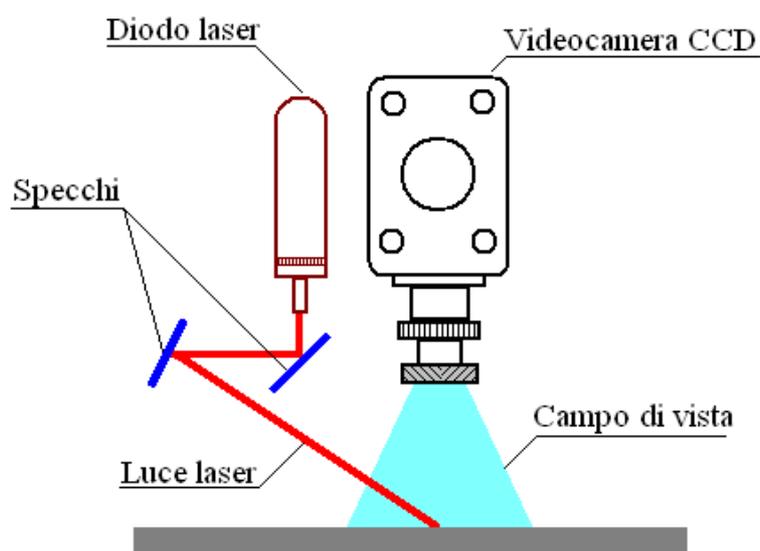


Figura 6.3 – Configurazione del sensore di visione

Il circuito della videocamera genera un segnale video NTSC standard che è immagazzinato nel processore di visione come una matrice di 640x480 pixel ad 8 bit.

L'algoritmo di visione, come mostrato in Figura 4.4, è diviso in 2 fasi: PRIMA DELLA SALDATURA e DURANTE LA SALDATURA.

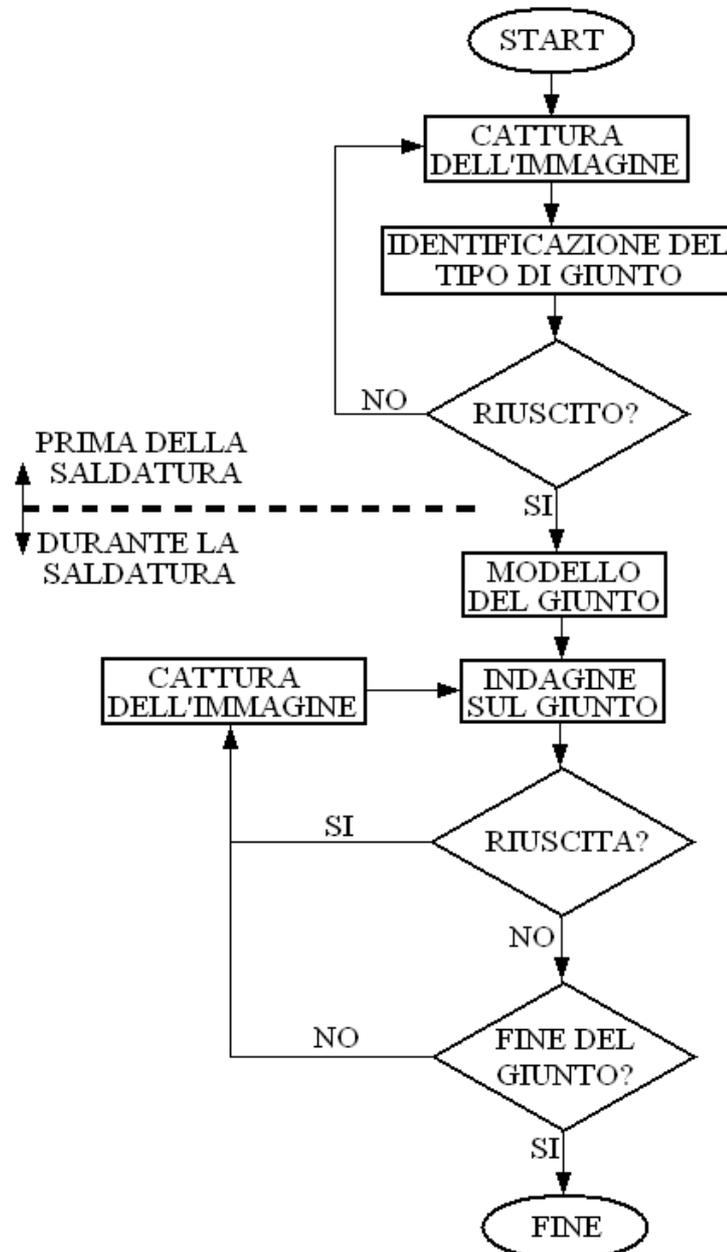


Figura 6.4 – Diagramma di flusso dell'algoritmo di elaborazione visivo

Affinché sia possibile individuare il punto iniziale del giunto, è necessario, inizialmente, ispezionare il pezzo in prossimità del giunto con arco spento, e,

successivamente, con l'ausilio dell'immagine, identificare il tipo di giunto. Il passo successivo viene effettuato durante la fase di saldatura nella quale l'obiettivo è quello di tracciare il giunto in base alla determinazione on-line delle caratteristiche del giunto saldato. Il modello del giunto ottenuto nella prima fase è abilmente usato in questa fase di tracciamento del giunto. Questa strategia è molto efficiente perché l'immagine, prelevata quando l'arco è spento è abbastanza pulita, e consente una buona precisione, mentre, l'immagine ottenuta durante la saldatura è, spesso, troppo disturbata, a causa dell'arco di saldatura e delle radiazioni provenienti dal metallo.

Per semplificare il lavoro appare utile che le coordinate del sensore di visione coincidano con quelle della torcia di saldatura, e l'origine è posizionata sulla punta della torcia.

Assumendo che la posizione U è la posizione del giunto relativa alle coordinate della torcia, e la matrice T è la trasformazione dalle coordinate della torcia alle coordinate di un sistema di riferimento fisso, la posizione assoluta del giunto P nel sistema di coordinate fisso può essere facilmente calcolato con la relazione $P=TU$.

La posizione del giunto U è calcolata utilizzando un modello di visione precedentemente calibrato.

Ora si indica con $P_w(i\Delta T)$ la posizione del giunto assoluta trovata al tempo $i\Delta T$, e $P_t(j\Delta t)$ la posizione assoluta della torcia al tempo $j\Delta t$, dove ΔT è il tempo di elaborazione del ciclo, Δt è il periodo di campionatura del *ROBOT POSITION CONTROL*.

Siccome la torcia segue il giunto reale a velocità costante v , il moto del robot richiesto durante un tempo campionatura Δt al tempo $j\Delta t$ può essere ottenuto dal seguente vettore ΔP :

$$\Delta P(j\Delta t) = \frac{E(j\Delta t)}{|E(j\Delta t)|} \cdot v\Delta t \quad (1-2)$$

Dove E è il vettore posizione dalla torcia al corrispondente giunto individuato e può essere scritto come:

$$E(j\Delta t) = P_w(i\Delta T) - P_t(j\Delta T) \quad (1-3)$$

Una volta che il vettore di moto ΔP è dato, la posizione per la torcia, che può essere estesa al prossimo ciclo di controllo $(j+1)\Delta T$, è data da:

$$P_t((j+1)\Delta t) = P_t(j\Delta t) + \Delta P(j\Delta t) \quad (1-4)$$

Il vettore posizione corretto della torcia $P_t((j+1)\Delta T)$ è trasformato nelle coordinate del giunto, e poi mandato al corrispondente *JOINT SERVO UNIT* per guidare ogni articolazione asincronamente.

6.1.3 – Sistema di saldatura robotica per un processo di saldatura SMAW

Alcuni studi hanno focalizzato la loro attenzione ai processi di riparazione SMAW come ad esempio il lavoro svolto dagli studiosi *P. C. Tung, M. C. Wu e Y. R. Hwang* del Dipartimento di Ingegneria Meccanica della National Central University di Taiwan.

La saldatura SMAW (saldatura ad arco rivestito) è una importante tecnologia per la produzione e la riparazione di prodotti in metallo ed è normalmente compiuta manualmente da un operatore. Questo tipo di saldatura non è facilmente applicabile in aree pericolose (cfr.: impianti nucleari per la produzione di energia, ambienti radioattivi o recipienti pressurizzati); si tratta di condizioni di lavoro in cui i tecnici sono sottoposti a grandi rischi per la propria salute, e, pertanto, sono obbligati ad indossare abiti speciali che limitano le possibilità di movimento, incidendo notevolmente sulla qualità delle prestazioni professionali dagli stessi offerta.

D'altro canto, va rilevato che i robot sono attualmente usati principalmente per processi di saldatura GTAW e GMAW in quanto tale lavoro di saldatura di solito consiste in operazioni ripetute con traiettorie fisse, ed i loro controllori possono essere pre-programmati per operare lungo percorsi di saldatura prefissati. Ma la saldatura effettuata allo scopo di riparare un lavoro spesso deve essere eseguito in luoghi diversi e i percorsi di saldatura non possono essere facilmente pre-programmati. Inoltre le tecniche di saldatura GTAW e GMAW non sono operazioni di saldatura adatti alle riparazioni a causa della loro scarsa mobilità; invece l'attrezzatura richiesta per la saldatura SMAW è molto semplice e compatta e può essere trasportata facilmente, assicurando anche l'applicabilità su materiali diversi e con diverso spessore.

Questo spiega perché operazioni di riparazioni vengono convenzionalmente eseguite con una tecnica di saldatura SMAW e per quale motivo gli studiosi hanno rivolto il proprio sguardo all'automazione di questo tipo di processo.

Il metallo con il metodo di saldatura SMAW è riscaldato da un arco elettrico che scocca tra un elettrodo metallico rivestito e il metallo base. L'elettrodo utilizzato è soggetto ad usura in quanto il metallo d'apporto è ottenuto dalla fusione dell'elettrodo stesso. Per assicurare l'esistenza dell'arco elettrico che garantisce la saldatura, si deve mantenere una corrente continua e una piccola distanza tra la punta dell'elettrodo ed il metallo base che deve essere costante; infatti la variazione di tale distanza, di solito genera delle ondulazioni che influiscono sulle proprietà meccaniche dell'elemento saldato e lo indeboliscono.

Per mantenere costante la distanza tra la punta dell'elettrodo ed il metallo base in un sistema automatizzato il robot deve cambiare le sue traiettorie on-line.

I due problemi maggiori per la riparazione automatica di una saldatura sono:

1. Localizzare la posizione delle fessure
2. Compiere l'operazione di saldatura SMAW.

Nel lavoro svolto da *P. C. Tung, M. C. Wu e Y. R. Hwang* è stato utilizzato un robot CSORBOT-RE VII a cinque assi come quello mostrato nelle Figure 4.5 e 4.6.

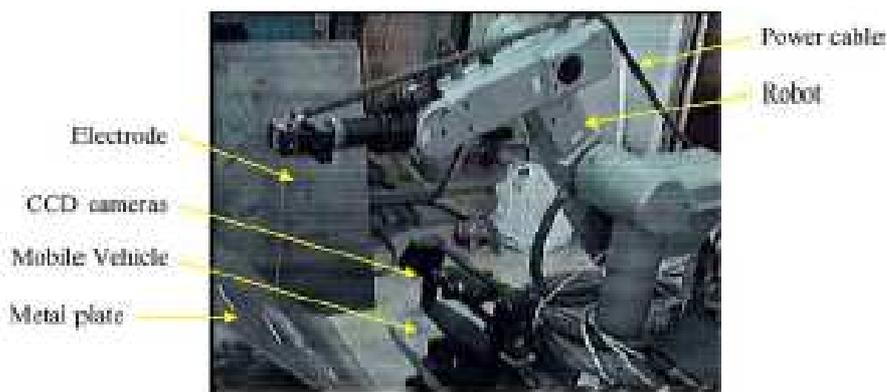


Figura 6.5 - Robot CSORBOT-RE VII a cinque assi

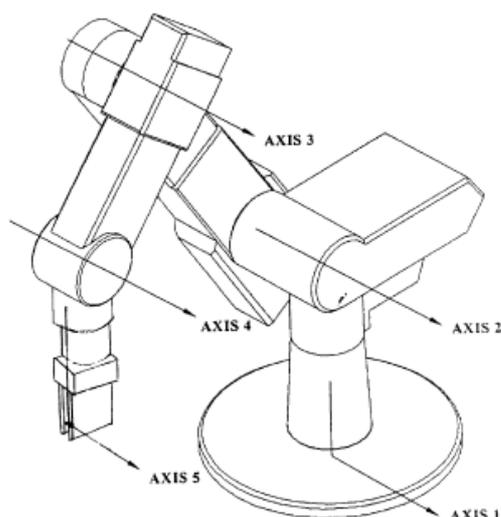


Figura 4.6 - Schematizzazione di un Robot CSORBOT-RE VII a cinque assi

Per l'individuazione della posizione delle fessure sono installate due videocamere con sensori CCD nella parte frontale della macchina mobile.

La presenza di due videocamere CCD parallele è utile per determinare la distanza tra l'oggetto e le videocamere. La Figura 4.7 mostra la relazione geometrica per un oggetto che appare di fronte alle due videocamere. Un sistema di coordinate è definito al centro della prima videocamera col suo asse Z lungo la

direzione normale alla lente, ed assi X e Y lungo gli assi x ed y dell'immagine. Si può dedurre la seguente formula:

$$Z = \lambda - \frac{\lambda B}{x_2 - x_1} \quad (1-5)$$

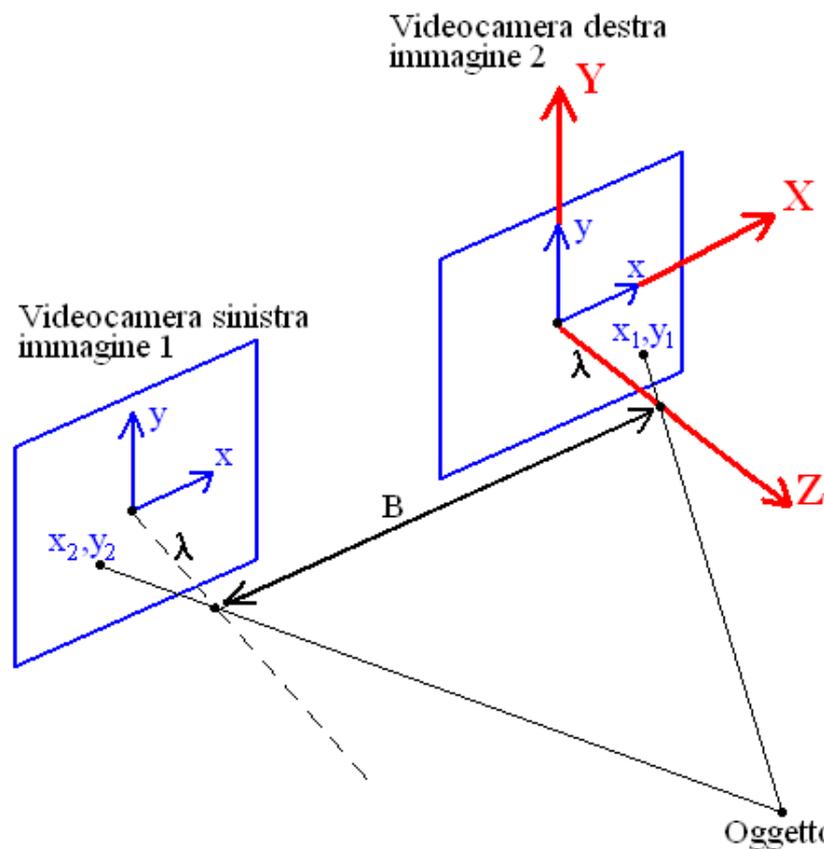


Figura 6.7 – Sistemi di coordinate per le videocamere CCD parallele

dove λ è la distanza focale; Z rappresenta la distanza tra l'oggetto ed il piano delle videocamere; B rappresenta la distanza tra i due centri delle due videocamere; x_1, y_1 sono le coordinate dell'immagine della prima videocamera; x_2, y_2 sono le coordinate dell'immagine della seconda videocamera. Dall'equazione (1-5), si può trovare Z , e una volta trovato Z , X e Y possono essere determinate con le seguenti formule:

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{x_1}{\lambda}(\lambda - Z) \\
 Y &= \frac{y_1}{\lambda}(\lambda - Z)
 \end{aligned}
 \tag{1-6}$$

Siccome le immagini delle due videocamere hanno uno spostamento orizzontale, il valore $(x_1 - x_2)$ può essere trovato comparando le disparità tra le due immagini. Per fare ciò in passato sono stati creati molti algoritmi di paragone, ma in questo studio, siccome le due videocamere sono state installate in parallelo, le immagini catturate da esse avranno una dislocazione orizzontale lungo la direzione X . Pertanto si è ritenuto opportuno utilizzare un nuovo algoritmo che compara la *proiezione totale dei valori grigio* lungo le linee orizzontali dell'immagine.

L'algoritmo utilizzato in questo studio è quindi costituito da 5 step di seguito riportati:

- **STEP 1:** Catturare le immagini sinistra e destra (denotate rispettivamente con $I_s(x,y)$ e $I_d(x,y)$);
- **STEP 2:** Trovare la loro immagini corrispondenti (denotate con $\underline{I}_s(x,y)$ e $\underline{I}_d(x,y)$ rispettivamente) dopo l'operazione di Sobel (operazione che filtra l'immagine per poter meglio riconoscere i bordi ed i contorni degli oggetti in esso presenti);
- **STEP 3:** Proiettare i valori di grigio di $\underline{I}_s(x,y)$ e $\underline{I}_d(x,y)$ in una linea parallela all'asse x dell'immagine, ottenendo:

$$\begin{aligned}
 P_s(j) &= \sum_{i=1}^m \underline{I}_s(j,i) \quad \text{con } j=1,2,3,\dots,n \\
 P_d(j) &= \sum_{i=1}^m \underline{I}_d(j,i) \quad \text{con } j=1,2,3,\dots,n
 \end{aligned}
 \tag{1-7}$$

- **STEP 4:** definire la funzione $J(k)$ come:

$$J(k) = \sum_{j=1}^n |P_s(j+k) - P_d(j)| \quad \text{con } k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1-8)$$

il valore di k che minimizza J rappresenta la disparità, cioè il valore $(x_1 - x_2)$ per queste due immagini;

- **STEP 5:** Utilizzare le equazioni 1-5 e 1-6 per calcolare i valori di X , Y , e Z

All'interno di questo studio sono stati poi effettuati una serie di esperimenti utilizzando differenti distanze focali, e distanze dell'oggetto variabili per verificare i risultati dell'algoritmo di proiezione. La Figura 4.8 mostra i risultati sperimentali quando la distanza focale è regolata a 500mm. La curva superiore e quella inferiore rappresentano rispettivamente il valore reale di Z e quello stimato in funzione della disparità tra le due immagini.

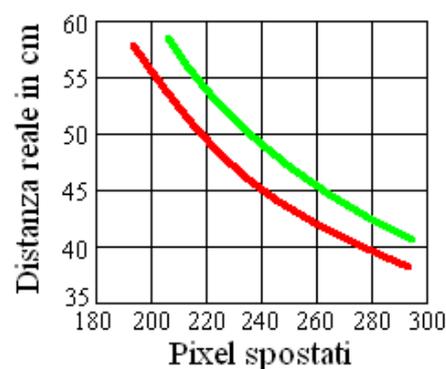


Figura 6.8 – Distanza Z tra l'oggetto e le videocamere

A causa dell'errore su Z , gli errori nella stima di X ed Y diventano troppo grandi per essere utilizzati in una saldatura robotizzata. Le ragioni possibili che possono causare questi errori includono gli errori di misura di B , λ , e il non parallelismo tra i sensori delle due videocamere. Infatti anche se si avesse la certezza che le videocamere sono perfettamente parallele tra loro, i rispettivi sensori potrebbero non esserlo ed è complicato modificare la posizione dei sensori delle telecamere in quanto questi ultimi sono installati all'interno delle videocamere. Quindi bisogna aggiungere 2 parametri di adattamento per il calcolo della equazione 1, cioè:

$$Z = \lambda - \frac{\lambda B}{x_2 - x_1} m_2 + m_1 \quad (1-9)$$

dove m_1 e m_2 sono *parametri di compensazione*. Il parametro m_1 può essere considerato una compensazione della distanza focale λ , mentre m_2 può essere considerato una compensazione di B . Minimizzando l'errore minimo quadratico della differenza tra il valore reale e quello stimato di Z , si possono ottenere i valori ottimi di m_1 e m_2 .

Per quanto riguarda la struttura del sistema di saldatura automatico utilizzato in questo studio, esso, come illustrato in Figura 4.9, comprende un Personal Computer (PC), un veicolo mobile, un robot e una sorgente di energia per la saldatura.

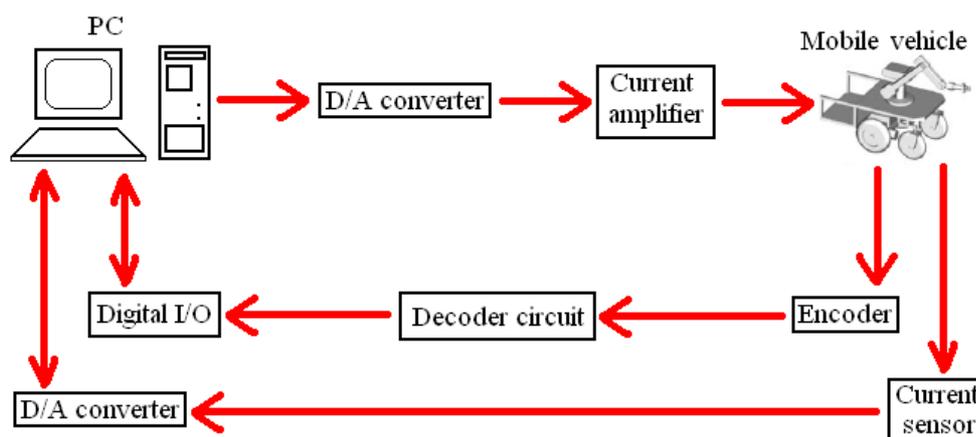


Figura 6.9 – struttura del sistema di saldatura

La corrente di saldatura viene misurata da un *Current sensor* e trasformata in un segnale digitale dal *D/A converter*. L'angolo dell'articolazione letto da un *Decoder circuit* viene portato al *PC*. Il *PC* gestisce l'algoritmo di controllo mandando un segnale che controlla il robot per effettuare il processo di saldatura. Il voltaggio dei segnali di controllo sono inviati attraverso un *A/D converter* ad un *Current amplifier* che guida i motori posti all'interno del robot.

6.1.4 – Studio su sensori di visione per il rilevamento del giunto di saldatura per pezzi ad altezza variabile

Un decisivo passo in avanti sui sistemi di visione per il rilevamento del giunto di saldatura è stato fatto con gli studi effettuati presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Korea Advanced Institute of Science and Technology i cui sforzi sono stati rivolti dapprima verso la ricerca verso la ricerca dapprima di un opportuno modello matematico, e poi, verso applicazioni pratiche.

Si riassumerà brevemente questo studio.

L'obiettivo del lavoro degli autori, in particolare, è di migliorare la qualità e la produttività nella saldatura dei container per il traffico marittimo e dei serbatoi per il deposito di LNG (Gas Naturale Liquefatto) che sono costituiti da un gran numero di fogli di metallo ondulato. Tale ondulazione conferisce un'eccellente stabilità strutturale, ma è responsabile di una grande difficoltà nell'automatizzazione della saldatura. Infatti, è difficile determinare la configurazione corretta del sistema di sensori, inclusa la videocamera CCD ed il diodo laser, per l'interferenza ed il moto relativo tra il sensore di visione e la torcia di saldatura.

Il sistema di saldatura comprende un robot che ha 2 gradi di libertà, un *meccanismo di rotazione della torcia*, un *sensore di visione* composto da una videocamera CCD, un *diodo laser* ed un *Personal Computer* per l'elaborazione delle immagini e la movimentazione della torcia disposti come mostrato in Figura 4.10.

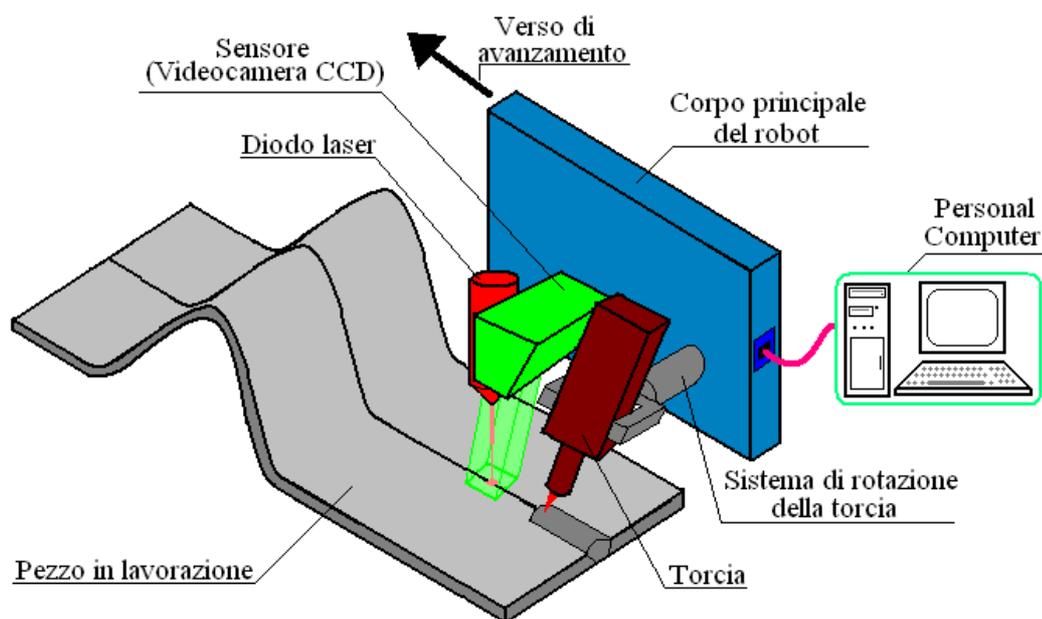


Figura 6.10 – Diagramma schematico di un sistema di saldatura automatico per saldature di pezzi ad altezza variabile

Siccome la torcia può ruotare per mantenere una posizione perpendicolare rispetto alla linea di saldatura delle piastre ondulate, mentre il sensore di visione è montato davanti alla torcia, la posizione relativa del sensore di visione rispetto alla linea di saldatura è differente da quella della torcia, e questo può procurare non pochi inconvenienti, giacché i dati ottenuti dal sensore di visione potrebbero essere influenzati dalla forma e dalla variabilità nell'altezza dei pezzi da saldare, in tutte le ipotesi in cui l'angolo e la relativa distanza tra la torcia di saldatura e la linea di saldatura sono mantenuti costanti.

Quindi, per avvalersi effettivamente dell'uso della saldatura ad arco automatica e robotizzata è imperativo sviluppare un *modello matematico* che possa essere facilmente programmato e che alimenti il robot. Tale modello deve offrire un alto grado di sicurezza nel predire la geometria del giunto di saldatura, deve coprire una grande serie di spessori dei materiali, e deve essere applicabile in tutte le posizioni di saldatura. I dati, quindi, devono essere resi disponibili in

forma di equazioni matematiche che mettano in relazione i parametri del processo di saldatura con la geometria del giunto.

I seguenti quattro sistemi di coordinate giocano un importante ruolo nella generazione in tempo reale del percorso di saldatura e per la simulazione al computer: il *sistema di coordinate di base* $[W]$, il *sistema di coordinate sulla punta della torcia* $[T]$, il *sistema di coordinate sul sensore* $[L \text{ e } C]$, ed il *sistema di coordinate sul giunto* $[S(k)]$.

Si noti che mentre i primi tre sistemi di coordinate sono fissi nello spazio, il *sistema di coordinate sul giunto* $[S(k)]$ è posizionato sul giunto di saldatura, e quindi varia lungo il giunto stesso. La relazione esistente tra i vari sistemi di coordinate è illustrata nella Figura 4.11, ma è utile procedere alla sua descrizione.

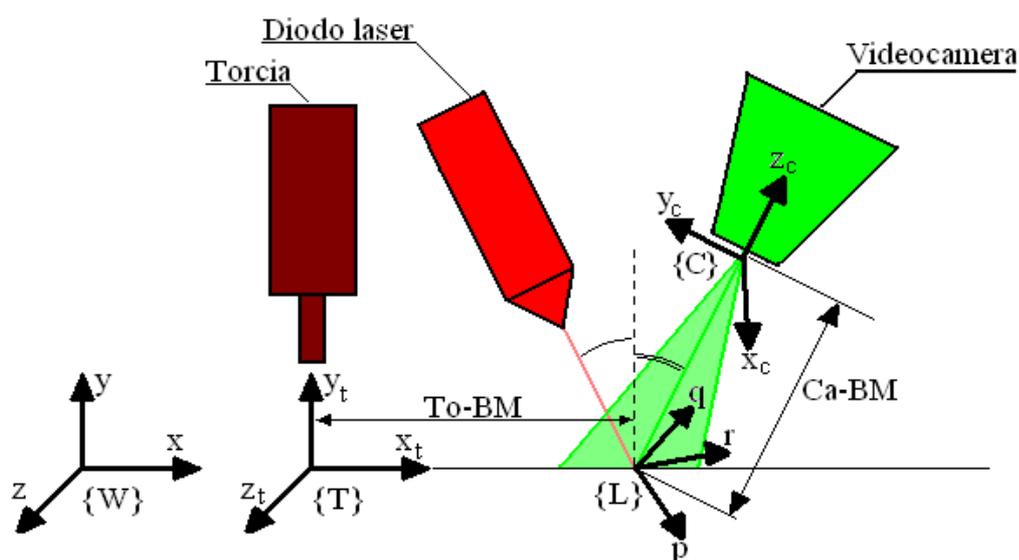


Figura 6.11 – Sistemi di coordinate utilizzate nello studio del percorso di saldatura

Il *sistema di coordinate di base [W]* è associato con il braccio del robot ed è posizionato alla base del robot stesso.

Il *sistema di coordinate sulla punta della torcia [T]* definisce la posizione e l'orientazione della torcia nel *sistema di coordinate di base [W]*. Questo sistema di coordinate ha la sua origine sulla punta della torcia ed è orientato con l'asse y lungo l'asse della torcia, asse x lungo la direzione di saldatura, ed asse z disposto seguendo la regola della mano destra. Si può supporre che la trasformazione delle coordinate sia ${}^W_T T$ con le sue due componenti di traslazione e di rotazione. Assumendo che la saldatura di pezzi ad altezza variabile abbia le linee laterali relativamente diritte, per il rilevamento del giunto sono necessari solo il movimento traslazionale dei due assi (x ed y) e la rotazione attorno all'asse z. La trasformazione delle coordinate ${}^W_T T$ può essere allora espressa come segue:

$${}^W_T T = R_z(\theta)T_x(\Delta x)T_y(\Delta y) \quad (1-10)$$

dove Δx e Δy sono gli spostamenti tra la punta della torcia e l'origine del *sistema di coordinate di base [W]* lungo le direzioni degli assi X ed Y nel *sistema di coordinate di base [W]*, e θ è l'angolo della torcia misurato dall'asse X del *sistema di coordinate di base [W]*. ${}^W_T T$ può essere rappresentato da una matrice di trasformazione omogenea come quella di seguito:

$${}^W_T T = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & \Delta x \\ s\theta & c\theta & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

Il sensore di visione ed i suoi componenti devono essere configurati per ottenere quanti più dati geometrici possibili per poter evitare collisioni con il pezzo in lavorazione.

L'*angolo di separazione* β è l'angolo tra l'asse del diodo laser e l'asse della videocamera ed è dato dalla somma dell'*angolo di separazione laser* β_l e l'*angolo di separazione della videocamera* β_c . L'*angolo di inclinazione* γ è definito come l'angolo di rotazione del sensore di visione attorno all'asse X.

La striscia formata dal raggio laser, proiettato sul piano X-Z è parallela all'asse Z, mentre l'angolo α è zero. Gli angoli α , β , e γ possono essere visualizzati nella Figura 4.12.

L'applicazione del rilevamento del giunto richiede una relazione di trasformazione tra il *sistema di coordinate sul sensore [L e C]* ed il *sistema di coordinate sulla punta della torcia [T]*. Questa trasformazione è determinata sin dal momento in cui la torcia ed il sensore di visione sono montati sul robot.

Il *sistema di coordinate sul sensore [L e C]* è costituito da due sistemi di coordinate: il *sistema di coordinate sul piano del laser [L]* ed il *sistema di coordinate sulla videocamera [C]*. Per determinare la trasformazione di coordinate ${}^C T$, dovrebbe essere definita prima la relazione tra il *sistema di coordinate sul piano del laser [L]* ed il *sistema di coordinate sulla punta della torcia [T]* e poi può essere definita la relazione tra il *sistema di coordinate sulla videocamera [C]* ed il *sistema di coordinate sul piano del laser [L]*.

Quindi la trasformazione di coordinate ${}^L T$ può essere espressa come segue:

$${}^L T = T_X (T_O - BM) R_Z(-90^\circ) R_X(-90^\circ) R_r(\gamma) R_q(-\beta_l) R_p(\alpha) \quad (1-12)$$

dove $To-BM$ è la distanza tra la punta della torcia ed il centro del campo di visione della videocamera (vedi Figura 4.11). ${}^L T$ può essere rappresentato da una matrice di trasformazione omogenea come la seguente:

$${}^L T = \begin{bmatrix} s\beta_l & c\beta_l s\alpha & c\beta_l c\alpha & To-BM \\ -c\gamma c\beta_l & s\gamma c\alpha + c\gamma s\beta_l s\alpha & -s\gamma s\alpha + c\gamma s\beta_l c\alpha & 0 \\ -s\gamma c\beta_l & -c\gamma c\alpha + s\gamma s\beta_l s\alpha & c\gamma s\alpha + s\gamma s\beta_l c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

Nel caso in cui il sensore di visione utilizzi un sistema di lenti, l'origine del sistema di coordinate sulla videocamera è posizionato al centro delle lenti ed il suo asse z_c è perpendicolare al piano dell'immagine, il piano x_c-y_c è parallelo al piano dell'immagine con l'asse y_c posizionato lungo la sua altezza, infine l'asse x_c è definito secondo la regola della mano destra.

La trasformazione di coordinate ${}^L T$ può essere espressa come segue:

$${}^L T = R_q(\beta - 90^\circ) R_p(-\alpha) T_r(Ca - BM) \quad (1-14)$$

dove $Ca-BM$ è la distanza tra il centro delle lenti ed il campo visivo della videocamera (vedi Figura 4.11). ${}^L T$ può essere rappresentato sotto forma di matrice di trasformazione omogenea nel seguente modo:

$${}^L_c T = \begin{bmatrix} s\beta & c\alpha c\beta & -c\alpha s\beta & -Ca - BM & c\alpha c\beta \\ 0 & c\alpha & s\alpha & Ca - BM & s\alpha \\ c\beta & -s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & Ca - BM & c\alpha s\beta \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

Gli angoli α, β e γ possono essere visualizzati nella seguente Figura 4.12

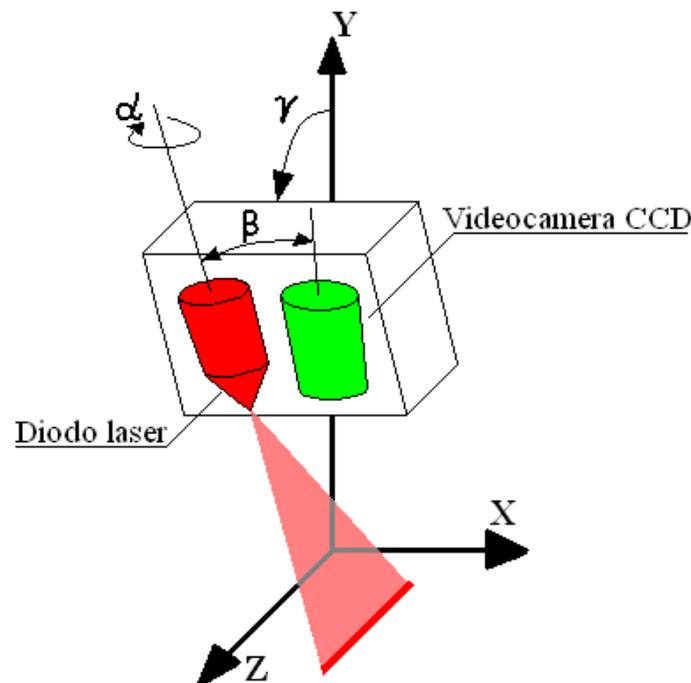


Figura 6.12 – Definizione degli angoli nel sistema di visione

In definitiva la simulazione in tempo reale della rilevazione del giunto richiede l'uso di quattro sistemi di coordinate: *sul giunto, sulla punta della torcia, sul piano del laser e sulla videocamera* analizzati in precedenza. Grazie a questi sistemi di coordinate è possibile descrivere qualsiasi punto del giunto, e grazie alle trasformazioni viste in precedenza è possibile esprimere le coordinate di tale punto in tutti i sistemi di riferimento.

Gli autori hanno posto al centro della loro attenzione, come accennato prima, la saldatura delle lamiere ondulate utilizzate per la realizzazione di container per il trasporto marittimo delle merci, e per i serbatoi per LNG (Gas Naturale Liquefatto). La Figura 4.13 mostra due tipiche lamiere ondulate utilizzate per gli scopi descritti in precedenza.

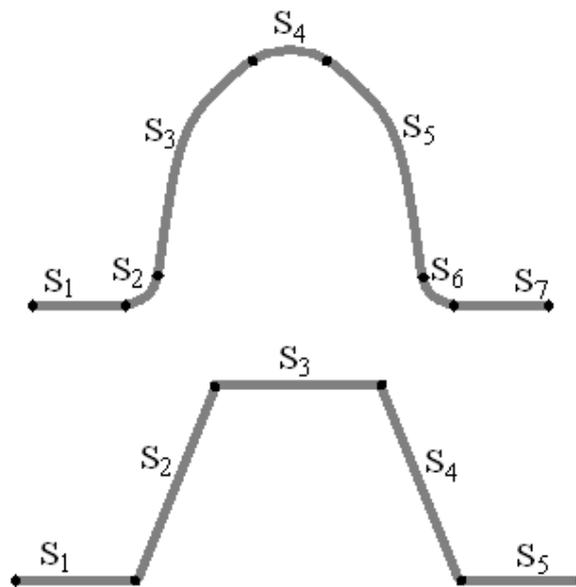


Figura 6.13 – Tipici esempi di lamiere ondulate

Si pone l'attenzione sulla prima delle due figure. Essa è costituita da due parti lineari (i segmenti S₁ ed S₇) e da cinque archi circolari (S₂, S₃, S₄, S₅ ed S₆). In generale ogni segmento della superficie ondulata può essere espresso sottoforma di vettore nel modo seguente:

$$S_k = \begin{pmatrix} a_k \\ b_k \\ r_k \\ \theta_{s,k} \\ \theta_{f,k} \end{pmatrix} \quad (1-16)$$

dove S_k è il k -esimo segmento dell'ondulazione, a_k e b_k sono rispettivamente la coordinata x e quella y del suo punto iniziale, r_k è la sua lunghezza, $\theta_{s,k}$ e $\theta_{f,k}$ sono rispettivamente gli angoli delle tangenti nel punto iniziale e nel punto finale del k -esimo segmento misurati rispetto all'asse x.

Quando la punta della torcia segue esattamente il giunto che presenta un'altezza variabile mantenendosi perpendicolare alla superficie da saldare, mentre il sensore di visione forma con essa l'angolo β , la posizione e l'orientazione del sensore di visione possono essere descritti nello spazio bidimensionale. Quindi, il punto di intersezione tra il piano del laser ed il metallo base può anche essere determinato nello spazio bidimensionale come mostrato nella Figura 6.13.

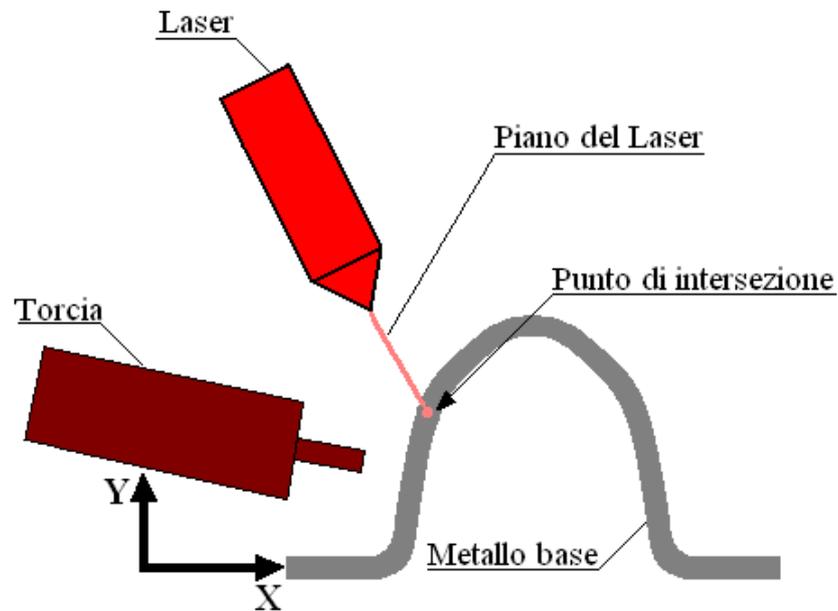


Figura 6.13 – Punto di intersezione tra il piano del laser ed il metallo base nello spazio bidimensionale

Per ottenere il punto di intersezione tra il piano del laser ed il metallo base nello spazio bidimensionale, è richiesta la descrizione del piano del laser e la forma del elemento da saldare che presenta altezza variabile. Nel piano X-Y il piano del laser altro non è che una linea. Siccome l'asse p del *sistema di coordinate sul piano del laser* $[L]$ coincide con una linea nello spazio bidimensionale, la linea rappresentativa il piano del laser può essere espressa parametricamente con le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} X_w &= A_x + B_x p \\ Y_w &= A_y + B_y p \end{aligned} \quad (1-17)$$

dove p è un parametro sull'asse p del *sistema di coordinate sul piano del laser [L]*, A_X ed A_Y sono i valori delle coordinate X ed Y rispettivamente dell'origine del *sistema di coordinate sul piano del laser* rispetto al sistema di coordinate fisso, e B_X e B_Y sono rispettivamente il seno ed il coseno della pendenza del piano del laser. A_X , A_Y , B_X e B_Y possono essere ottenuti trasformando il *sistema di coordinate sul piano del laser [L]* nel sistema di coordinate fisso passando attraverso il *sistema di coordinate sulla punta della torcia [T]*.

La saldatura ad altezza variabile consta di ogni segmento la cui forma può essere descritta nello spazio bidimensionale dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} X_W &= a_k + c_1 S_k^i \\ Y_W &= b_k + c_2 S_k^i \end{aligned} \quad (1-18)$$

dove a_k e b_k sono rispettivamente i valori delle coordinate X ed Y del punto iniziale del k -esimo segmento nel sistema di coordinate fisso; S_k^i è la distanza dal punto iniziale del k -esimo segmento allo i -esimo componente che è espressa come:

$$S_k^i = S_k^{i-1} + \Delta s \quad (1-19)$$

dove Δs è la distanza percorsa dalla torcia ad ogni passo durante il rilevamento; c_1 e c_2 sono costanti che variano per ogni segmento. S_k^i deve soddisfare la condizione per cui deve risultare più piccolo della lunghezza del segmento (r_k) e più grande di zero.

Le equazioni (1-17) sono equivalenti alle equazioni (1-18) nel punto di intersezione, perché il punto di intersezione è sul piano del laser, e allo stesso tempo sul corrispondente segmento costituente la lamiera ondulata nello spazio bidimensionale. Per trovare il valore della coordinata p sull'asse p , le precedenti equazioni possono essere poste in forma vettoriale come segue:

$$\begin{bmatrix} B_X & -c_1 \\ B_Y & -c_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} p \\ S_k^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_k - A_X \\ b_k - A_Y \end{pmatrix} \quad (1-20)$$

Il valore della coordinata p sull'asse p nel *sistema di coordinate sul piano del laser* [L] è quella del punto di intersezione tra il piano del laser ed il metallo base e che può essere utilizzata per effettuare la rilevazione del giunto.

È bene mettere in evidenza che se si ottengono più punti di intersezione dall'equazione (1-20), il valore più piccolo di p è il punto di intersezione tra il piano del laser ed il metallo base perché il raggio laser non può trasmettersi attraverso il metallo base.

Il valore della coordinata p determinata sull'asse p del *sistema di coordinate sul piano del laser* [L] può poi essere facilmente trasformabile nel sistema di coordinate fisso utilizzando le trasformazioni ${}^W T$ e ${}^L T$ viste in precedenza.

Infine, si può concludere che, per verificare il modello matematico del sensore di visione prima esposto e verificare l'efficienza del sistema di misurazione, gli autori hanno condotto numerosi esperimenti e simulazioni riscontrando, però, un problema di insufficienza di dati provocato dal fatto che

solitamente il sensore di visione, come già accennato in precedenza, è montato 30-40 mm davanti alla torcia nella direzione della saldatura.

Insufficienza di dati significa che il sensore di visione non può misurare la geometria della superficie. Le insufficienze di dati che più frequentemente si verificano sono due e cioè:

- *missing field of view*: cioè la luce del raggio è riflessa dall'oggetto ma non è osservata dalla videocamera perché esso sta più avanti rispetto al campo di vista della videocamera;
- *shadow effect*: cioè una parte dell'oggetto nasconde la riflessione della luce dall'area irradiata che non raggiunge la videocamera.

6.1.5 – Rilevamento e posizionamento del giunto per una saldatura a fascio elettronico

Un altro importante studio è stato portato avanti dal Prof. D. Fritz dell'Istituto delle Tecniche Informatiche dell'Università di Karlsruhe (Germania) sul rilevamento ed il posizionamento del giunto per una saldatura a fascio elettronico attraverso lo studio della Secondary Electron Emission Sensing (SEES).

La saldatura a fascio elettronico, detta anche EBW, è una saldatura che si ottiene focalizzando un fascio di elettroni sottile ad alta energia sul pezzo da lavorare che fonde a causa dell'energia cinetica posseduta dagli elettroni che si trasforma in calore, concentrando così un'elevata quantità di energia in un'area molto piccola dando quindi origine a saldature profonde e strette, cioè con un alto rapporto profondità/sezione.

In realtà, però, quando un elettrone, o ancora meglio un fascio di elettroni, come in questo caso, impatta su un materiale metallico, l'energia trasferita può provocare l'espulsione di altri elettroni dal materiale, fenomeno questo conosciuto con il nome di *Emissione Elettronica Secondaria*.

Lo studio condotto dal prof. Fritz consiste proprio nell'esaminare l'emissione elettronica secondaria per ricavare informazioni sul giunto della saldatura.

In particolare, quando il fascio elettronico colpisce un materiale solido si generano ioni ed una frazione del fascio elettronico si riflette all'indietro in un processo che segue le seguenti leggi fisiche:

- come mostrato in Figura 4.15, la frazione del raggio dispersa all'indietro si accresce con il numero atomico del materiale che deve essere saldato. Esso è indipendente dall'energia del fascio elettronico, dallo stato fisico del materiale, e dalle proprietà ottiche della superficie.

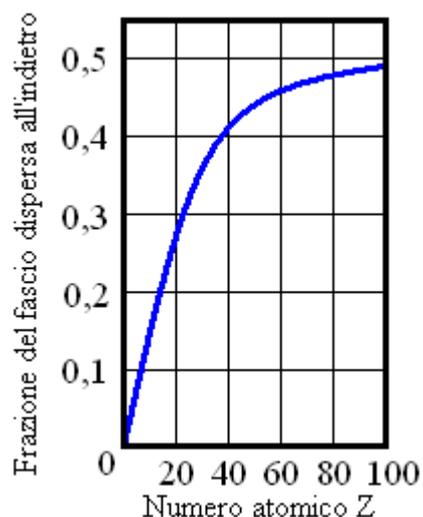


Figura 6.15 – Frazione del raggio disperso all'indietro in funzione del numero atomico

- Lo spettro di energia degli elettroni dispersi all'indietro dipende dal numero atomico del materiale
- La distribuzione direzionale degli elettroni dispersi all'indietro ha un massimo che segue approssimativamente la legge della riflessione ottica, cioè l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione
- L'intensità della dispersione cresce con l'aumentare dell'angolo α di incidenza del fascio (angolo compreso tra il fascio elettronico e la superficie normale sul punto di incidenza del fascio), come indicato in Figura 4.16

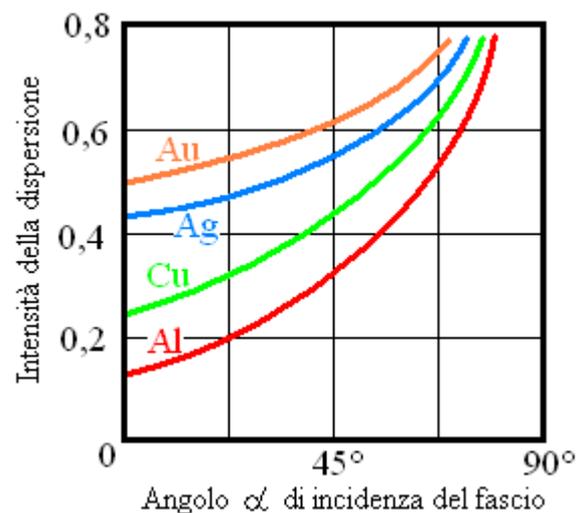


Figura 6.16 – Intensità della dispersione in funzione dell'angolo di incidenza del fascio elettronico

Quindi, per il rilevamento del giunto nella saldatura EBW in questo studio si è pensato di utilizzare un *collettore* come mostrato nella Figura 4.17, montato sopra la superficie del pezzo lavorato che monitora continuamente l'ondata di

elettroni prodotta e che indica una riduzione nella grandezza dell'ondata corrente raccolta ogni volta che il fascio primario passa sul giunto aperto. Questo segnale di giunto aperto può, successivamente, essere esaminato ed analizzato da un circuito elettronico capace di produrre un segnale di uscita errato. L'ampiezza e la polarità di questo segnale di errore corrisponde alla localizzazione del giunto per quanto riguarda il punto centrale dell'azione di attraversamento del fascio.

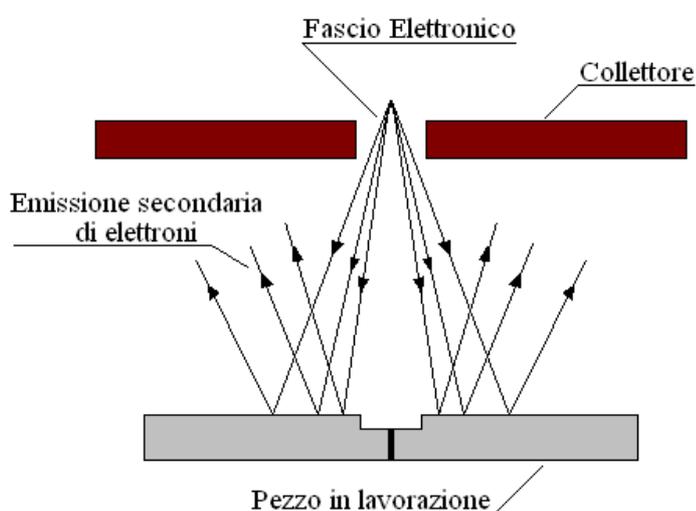


Figura 6.17 – Schema di saldatura a fascio elettronico, con rappresentazione dell'emissione secondaria di elettroni e del collettore

Fritz completò il suo lavoro rendendolo applicabile in ambito industriale con opportune precisazioni.

La procedura è la seguente: dapprima si rileva il giunto con un test di prova effettuato precedentemente all'operazione di saldatura utilizzando un raggio di elettroni a bassa energia, in questo modo il giunto viene analizzato e la sua posizione viene memorizzata, e successivamente viene presa la decisione *go/no*

go, vale a dire procedere o meno alla saldatura stessa confrontando la grandezza del giunto con quella del fascio utilizzato per effettuare la saldatura.

Gli approfonditi studi condotti hanno determinato l'applicazioni di questa tecnica nel settore aeronautico, missilistico, nucleare, e automobilistico.

6.1.6 – Ispezione del gap ed allineamento utilizzando una tecnica di visione per la saldatura laser del giunto testa-testa

Gli studi condotti dai professori J.Y. Jeng, T.F. Mau e S.M. Leu del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università della Scienza e della Tecnologia di Taiwan hanno invece avuto ad oggetto l'ispezione del gap e sull'allineamento utilizzando una tecnica di visione per un processo di saldatura laser di un giunto testa-testa.

Il loro studio è partito dalla considerazione che il processo di saldatura laser è stato largamente applicato nelle industrie elettroniche e meccaniche a causa della sua alta velocità di saldatura, dell'ottima penetrazione, della facile automazione e dell'alta accuratezza. È importante evidenziare che la maggior parte delle sue caratteristiche nascono dalle proprietà del raggio laser di essere focalizzato su uno spot di circa 0,1-0,2 mm per la maggior parte delle applicazioni meccaniche, e su uno spot anche più piccolo per applicazioni elettroniche.

Per questo studio sono stati utilizzati un laser CO₂ da 3 kW ed una postazione di lavoro CNC effettuando una saldatura testa-testa di acciaio inossidabile SUS304. Il laser è stato focalizzato a circa un terzo dello spessore del materiale sotto della superficie del pezzo in lavorazione. È stata impiegata inoltre

una videocamera con sensore CCD per ottenere un'immagine del giunto e del gap tra gli elementi.

Il percorso di saldatura per lo studio in esame può essere una linea dritta o anche un arco o un cerchio perché la maggior parte delle postazioni di lavoro CNC leggono questi tre tipi di *codici numerici* (NC), ma in questo caso l'attenzione è stata focalizzata su un percorso ad arco mostrato nella Figura 4.18.

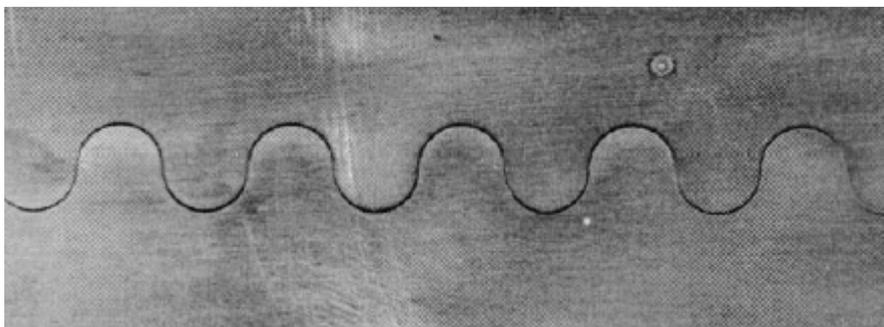


Figura 6.18 – Un campione di saldatura con percorso ad arco

Una volta determinato il percorso di saldatura, può essere generato il corrispondente *codice numerico* (NC).

Per calcolare il gap tra gli elementi da saldare, entrambi i lati degli elementi devono essere migliorati. Per ottenere tali miglioramenti del bordo sono stati utilizzate tecniche di *Laplace* e di *threshold* (soglia) combinati con un algoritmo di *filtro passa-alto* in modo da mettere in risalto il gap di saldatura. Il metodo di calcolo per il gap di saldatura è illustrato nella Figura 4.19.

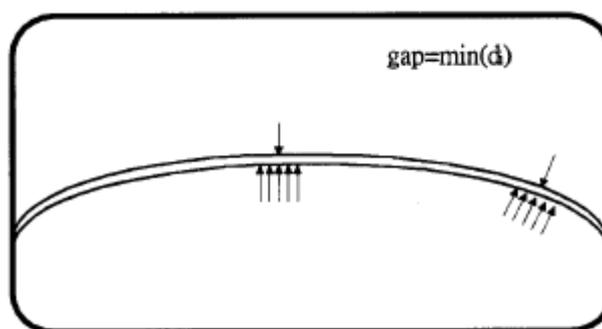


Figura 6.19 – Diagramma del calcolo del gap di saldatura

I sei punti, disposti intorno al punto considerato, sono stati inclusi nei calcoli del gap di saldatura. La minima distanza del risultato calcolato è stata presa a riferimento come gap di saldatura.

Uno dei grandi vantaggi della saldatura laser è di essere un tipo di saldatura con foro guida o *keyhole*. La *keyhole* si forma quando un fascio di densità di potenza elevata causa la vaporizzazione del substrato con formazione di un vero e proprio foro. La pressione prodotta dal vapore nel cratere provoca lo spostamento verso l'alto del metallo fuso lungo le pareti del foro. Nel foro si accumula quindi una grande quantità di energia che in alcuni casi è in grado di far proseguire la saldatura senza l'ausilio del laser.

La condizione necessaria per la formazione della *keyhole* è l'alta densità di energia che è il risultato della piccola grandezza dello spot del raggio laser e della sua alta energia.

Ci sono, perciò, due criteri per la formazione della *keyhole* nella saldatura laser per un giunto testa-testa. Il primo, è che il raggio laser focalizzato deve essere allineato col centro del gap di saldatura. Il secondo, è che la grandezza del gap di saldatura deve essere più piccolo della metà del diametro del raggio laser. Questi due criteri rendono la saldatura laser difficilmente applicabile nell'ambito

industriale in quanto producono difficoltà di allineamento e di ispezione del gap di saldatura. La Figura 4.20 illustra un esempio di disallineamento del gap per un giunto testa-testa.

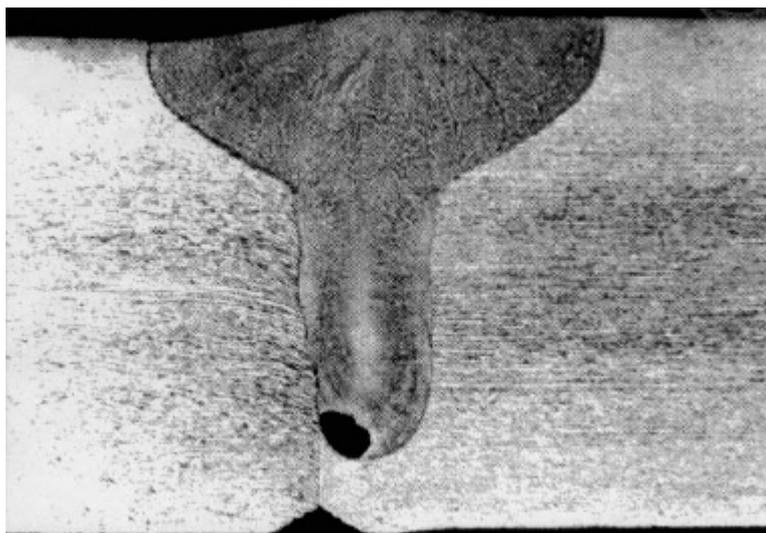


Figura 6.20 – Vista trasversale del disallineamento in una saldatura laser

Dalla Figura 4.20, si nota chiaramente che un lato del materiale è portato a fusione completamente, ma l'altro lato non è stato portato a fusione abbastanza per una completa e sufficiente penetrazione.

Lo scopo di questa indagine è usare la tecnologia di visione per allineare automaticamente il piccolo spot del raggio laser col centro del gap di saldatura, ed ispezionare il gap di saldatura per assicurarsi che la grandezza del gap risulti più piccola della metà del diametro del raggio laser.

Per allineare automaticamente il raggio laser col centro del gap di saldatura è stata impiegata una videocamera CCD con la quale poter catturare l'immagine del

pezzo in lavorazione. Le immagini originali catturate del pezzo in lavorazione sono mostrate nella Figura 4.21.

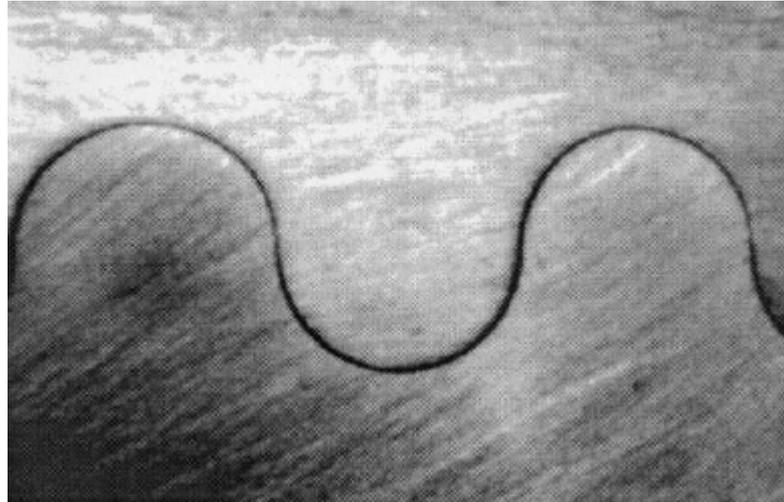


Figura 6.21 – Immagine originale del pezzo in lavorazione

Questa immagine però è troppo omogenea per rilevare il confine di saldatura, perciò è stato utilizzato un algoritmo di filtrazione *passa-alto* per elaborare l'immagine originale catturata. L'immagine elaborata in questo modo è mostrata in Figura 4.22.

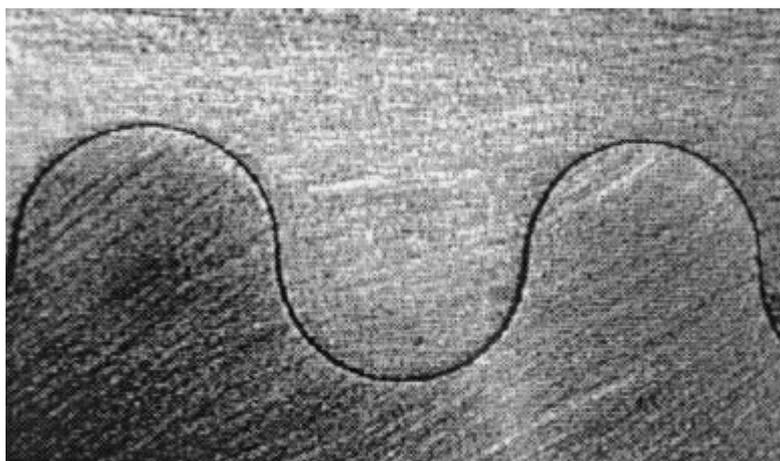


Figura 6.22 – Immagine elaborata utilizzando un *filtro passa-alto*

Come mostrato nella Figura 4.22, il bordo dell'immagine è molto più chiara e nitida di quella mostrato nella Figura 4.21. Da ciò si deduce che un *filtro passa-basso* non è indicato per questa applicazione, perché rende l'immagine più uniforme la qual cosa non rende facile distinguere il confine della saldatura.

È stato poi impiegato un *algoritmo di elaborazione lineare* per elaborare l'immagine filtrata con il *filtro passa-alto*. La coordinata del confine della saldatura può essere determinata e può essere generato il *codice numerico* (NC) per il percorso di saldatura utilizzando l'algoritmo di calcolo del percorso di saldatura. Il codice numerico (NC) per il percorso di saldatura con un campione di tipo ad arco è mostrato nella Tabella 1.1.

M31, 1	M24+	G02X-3.03Y20.20, +5.46
G10, 10, 1200, 2400	M23+	G02X0.79Y26.92, +5.10
G11X10, 1200, 2400	G38	G03X6.14Y30.08, +5.53
G11Y10, 1200, 2400	G03X3.58Y-3.52, +4.99	G03X4.25Y36.23, +5.00
G91	G03X-0.17Y-2.66, +8.92	G39
G00X120.00	G02X-2.98Y3.83, +4.81	M23-
G00Y-120.00	G02X0.88Y6.92, +4.62	M24-
G92X0Y0	G03X5.66Y9.36, +5.09	G00Y120.00
G90	G03X6.36Y12.41, +4.89	G00X-120.00
G01X4.66Y-11.76	G03X2.47Y16.98, +4.93	M30

Tabella 1.1 – Codice numerico per il percorso di saldatura con campione di tipo ad arco

Quindi, il banco di lavoro per l'operazione di saldatura può essere guidato utilizzando questo codice numerico (NC), ed il raggio laser sarà sempre allineato col centro del gap.

Durante la saldatura laser per un giunto testa-testa, però, la grandezza del gap di saldatura deve essere sempre più piccola della metà della grandezza dello spot del raggio laser focalizzato, altrimenti il raggio laser passerà direttamente attraverso il gap di saldatura ed un lato del materiale di saldatura potrebbe assorbire troppa poca energia per essere portata a fusione, come mostrato in Figura 4.20.

Per soddisfare questo criterio il gap di saldatura è stato ispezionato on-line e la grandezza del gap è stata immediatamente calcolata utilizzando l'immagine catturata precedentemente che è stata elaborata con molti algoritmi di elaborazione dell'immagine per migliorare il confine del gap di saldatura

In questo studio per calcolare la grandezza del gap di saldatura per giunti testa-testa, il bordo di saldatura è stato migliorato utilizzando le semplici operazioni di *threshold* e di *Laplace* con un *filtro passa-alto*.

L'immagine catturata precedentemente, come mostrato in Figura 4.21, è stata trattata utilizzando una semplice *operazione di threshold* (soglia). Due diverse

soglie sono state utilizzate in questa applicazione e la migliore delle immagini trattate è mostrato in Figura 4.23.



Figura 6.23 – Segmentazione dell'immagine con una *soglia* troppo alta

Comunque, non è facile determinare una soglia appropriata per produrre il buona segmentazione dell'immagine come mostrato nella Figura 4.23. Questa semplice soglia non era applicabile perché nell'immagine l'illuminazione non era facile da controllare in modo da renderla uniforme su tutta l'area.

L'immagine catturata è stata elaborata utilizzando un'*operazione di Laplace diretta* i cui risultati sono apprezzabili in Figura 4.24.

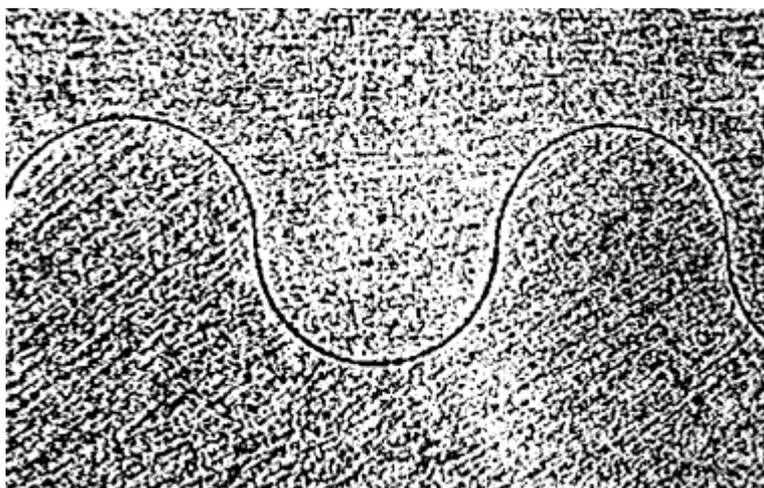


Figura 6.24 – Immagine dell'operazione di Laplace diretta dell'immagine catturata

La *segmentazione* dell'immagine dell'operazione di Laplace diretta è mostrato in Figura 4.25.



Figura 6.25 – Segmentazione dell'immagine dell'operazione di Laplace diretta

L'algoritmo di calcolo del gap di saldatura è mostrato in Figura 4.19. Il gap di saldatura del campione di prova era 0,12 mm. Della grandezza del gap di saldatura è stata fatta la media per ogni 15 pixels dalla segmentazione dell'immagine. La grandezza media della saldatura era 0,105 mm per tutto il percorso di saldatura. L'errore medio della grandezza del gap di saldatura era 0,015 mm (dato da $0,12 - 0,105$). Questo errore è molto meno della metà del diametro dello spot laser di 0,5 mm.

La saldatura laser automatica per giunti testa-testa utilizzando la tecnica di elaborazione delle immagini aiuterà, quindi, a risolvere i problemi di calcolo del percorso di saldatura e di ispezione della grandezza del gap.

In definitiva da questo lavoro possono essere dedotte le seguenti conclusioni:

1. Il disallineamento del raggio laser dal centro del gap di saldatura ed il mantenimento di una grandezza del gap minore della metà dello spot del raggio laser focalizzato limita l'applicabilità industriale della saldatura laser per giunti testa-testa.
2. Un semplice *filtro passa-alto* ed un *algoritmo di soglia* consentono la determinazione del percorso di saldatura e generazione del codice numerico NC del percorso di saldatura. Usare l'*operazione di Laplace* per elaborare l'immagine di saldatura è un algoritmo molto efficace per la segmentazione dell'immagine globale del campione di saldatura in modo da poter calcolare la grandezza del gap.
3. I problemi di disallineamento del raggio laser e l'ispezione della grandezza del gap possono essere risolti utilizzando questa tecnica di elaborazione dell'immagine proposta. Le posizioni relative del raggio laser e del percorso di saldatura sono stati predeterminati la qual cosa consente l'allineamento automatico del raggio laser con il centro del gap

di saldatura. In aggiunta, il gap di saldatura è stato ispezionato on-line per mantenere la sua grandezza più piccola della metà dello spot del raggio laser focalizzato.

4. La saldatura laser automatica per giunti testa-testa e la sua applicabilità non ha più bisogno di essere limitata da problemi di disallineamento e di grandezza del gap.

6.1.7 – Un sistema di visione per il rilevamento del giunto ed il controllo del bagno di saldatura nella saldatura GMAW di tubi di acciaio

Nel 2001 K.Y. Bae, T.H. Lee e K.C. Ahn della Chinju National University (South Korea) effettuarono uno studio sul un sistema di percezione ottico per il rilevamento del giunto ed il controllo del bagno di saldatura nella saldatura GMAW di tubi di acciaio. In effetti tale studio era giustificato in quanto così come stanno aumentando le richieste di strutture tubolari allo stesso modo stanno aumentando i requisiti di grande produttività ed accuratezza nella manifattura di queste strutture.

Per collegare un tubo all'altro è prevalentemente usata la saldatura ad arco circolare, che consiste nelle procedure di *passata di base* (root pass) e *passata di riempimento* (fill pass).

Il processo di saldatura per la costruzione di strutture tubolari può essere realizzata con un'apparecchiatura automatica, ma la *passata di base* è molto difficile da automatizzare a causa di variabilità del gap dovuta a tolleranze di produzione, alla fase di preparazione che causa un inevitabile ammontare di distorsioni, eccentricità, e disadattamento, ed è quindi generalmente eseguita da un saldatore esperto. Per realizzare la completa automazione della saldatura dei

tubi di acciaio, quindi, dovrebbe prima essere automatizzata la procedura di saldatura della *passata di base* che richiede l'abilità di modificare la posizione della torcia e le condizioni di saldatura, trattando con una varietà di stati di riempimento.

Nel lavoro degli autori sopra citati tale tecnica utilizzata per osservare le immagini del bagno di saldatura avviene con l'ausilio di una *videocamera CCD* e un *filtro di passaggio di onda lunga* per abbassare l'intensità dell'arco, e siccome gli studi sono stati condotti utilizzando una vista dall'alto, può essere studiata solo l'ampiezza del bagno di saldatura. Lo studio si è ovviamente focalizzato su test di rilevamento del giunto e dal sistema di controllo del bagno di saldatura per la *passata di base* (root pass).

Il sistema di saldatura di tubi sviluppato in questo studio è costituito da un *posizionatore* per far ruotare il tubo, un *manipolatore* di saldatura a 5 assi, una *sorgente* di energia per la saldatura, un pannello di controllo ed un PC. La Figura 4.26 mostra uno schizzo schematico del manipolatore.

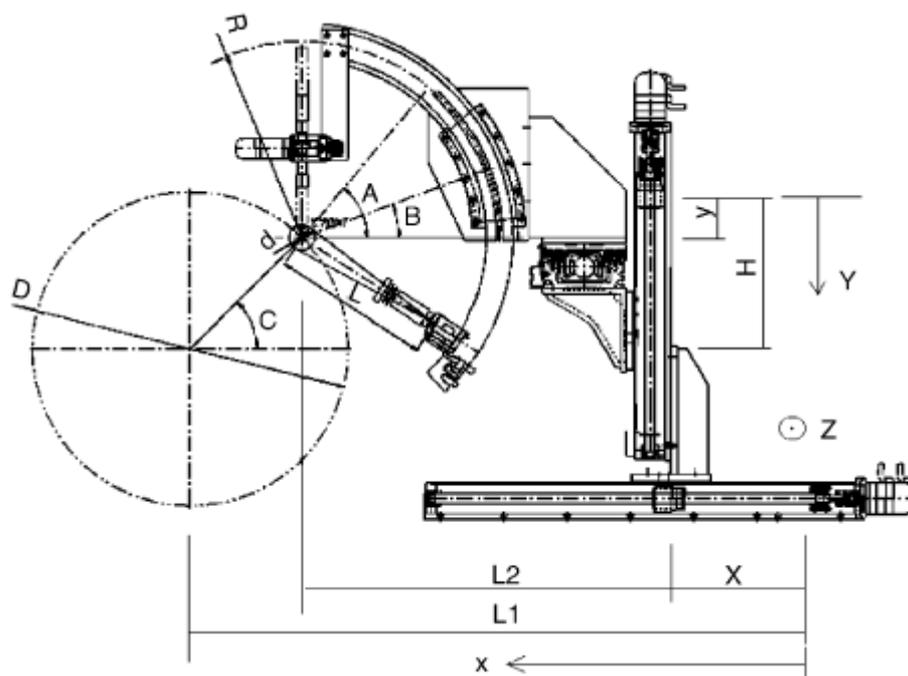


Figura 6.26 – Sistema di saldatura di tubi

Gli assi principali del manipolatore sono costituiti da tre assi cartesiani, dove gli assi X ed Y collaborano per spostare l'intelaiatura curva mantenendo la torcia di saldatura e la videocamera CCD fino alla posizione di saldatura predeterminata quando il diametro del tubo è noto. L'asse Z è utilizzato per il rilevamento del giunto.

Ruotando l'intelaiatura curva che mantiene la torcia, la torcia può ruotare attorno alla posizione di saldatura per un angolo di configurazione più adatto (asse A). Allo stesso modo, anche l'altra intelaiatura curva può ruotare la videocamera per un'altra configurazione (asse B), corrispondentemente alla configurazione della torcia, per osservare il bagno di saldatura.

Il manipolatore trova la posizione di saldatura (x,y) utilizzando le seguenti trasformazioni di coordinate con informazioni note sui tubi come il diametro D ed il punto di inizio della saldatura c .

$$\begin{aligned}x &= L_1 - L_2 - \frac{1}{2}D \cos(c) \\y &= H - \frac{1}{2}D \sin(c)\end{aligned}\tag{1-21}$$

Dove L_1 è la distanza dall'origine dell'asse X al centro del tubo lungo la direzione X, L_2 è la distanza dalla posizione x al centro dell'intelaiatura curva lungo la direzione X, ed H è la distanza dall'origine dell'asse Y al centro del tubo lungo la direzione Y. Queste quantità sono anche illustrate nella Figura 4.26.

La Figura 4.27 mostra un diagramma a blocchi del controller del sistema di saldatura dei tubi che è basato su un PC della IBM.

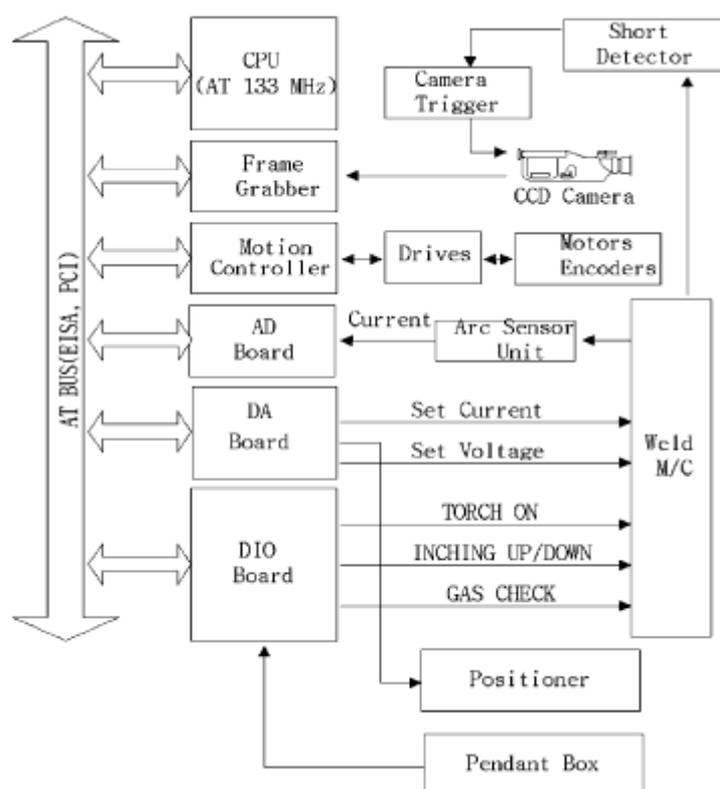


Figura 6.27 – Sistema di controllo della posizione della torcia e del bagno di saldatura

Il computer acquisisce le immagini del bagno di saldatura attraverso la *videocamera CCD* e la *Frame Grabber* (scheda di acquisizione grafica), stabilendo la corrente ed il voltaggio attraverso la *D/A converter board* (scheda di conversione analogico-digitale), inoltre controlla la corrente di saldatura attraverso la *D/A converter board*, gestisce se l'arco deve essere spento o acceso, controlla il filo, il gas, etc. attraverso la *Digital Input and Output (DIO) board* (scheda di ingresso ed uscita digitali). Il *computer* controlla anche la velocità di rotazione del posizionatore del tubo dalla variazione del voltaggio (0-10V) attraverso la *DA board*. In aggiunta al computer il *controller* ha una *short-circuit detection board* (scheda di individuazione del corto circuito) che genera un

segnale per la videocamera non appena rileva un corto circuito tra il filo ed il tubo.

La passata di base (root pass) utilizza una corrente bassa ed un basso voltaggio, e questo provoca contatti periodici tra il filo ed il metallo base, generando il fenomeno del *corto circuito* nel quale l'arco si estingue e la corrente aumenta improvvisamente. Perciò, si è pensato di osservare il bagno di saldatura solo durante il periodo di estinzione dell'arco che quindi non crea alcuna interferenza. Con questo concetto elementare di acquisire l'immagine del bagno di saldatura durante il periodo di corto circuito, è stato necessario individuare il corto circuito misurando la corrente.

Il segnale della corrente è stato misurato utilizzando una *resistenza di shunt* di $10^{-5} \Omega$ disposta in serie con il cavo della corrente.

Il piccolo segnale rilevato è stato utilizzato per dare il segnale alla videocamera di iniziare la ripresa del bagno di saldatura ed anche per segnalare alla frame grabber di acquisire l'immagine del bagno di saldatura in sincronia con la telecamera.

L'algoritmo di ricerca dell'immagine per rilevare il confine del bagno di saldatura è basato su una tecnica che ispeziona i pixel lungo la direzione in senso antiorario (a partire dalla posizione rilevata) intorno alla posizione al momento coperta. Nell'algoritmo proposto in questo studio la prossima direzione di ricerca è stata pre-determinata a 45° nella direzione antioraria. L'angolo dovrebbe essere poi incrementata con uno step di 45° fino a trovare il primo pixel che ha un livello di grigio sopra la soglia, ed il pixel trovato diventa un pixel di confine del bagno di saldatura. Questo algoritmo può essere espresso come segue:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(q) & \text{sen}(q) \\ -\text{sen}(q) & \cos(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (1-22)$$

dove u' e v' sono le componenti del vettore di direzione di ricerca per cercare il prossimo pixel di bordo, q è dato dalla relazione:

$$q = \frac{n\pi}{4} \quad (n = 1, \dots, 7) \quad (1-23)$$

e u e v sono le componenti del vettore di direzione di ricerca derivato dalla seguente equazione:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_B \\ j_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_P \\ j_P \end{bmatrix} \quad (1-24)$$

dove i e j sono le coordinate dei pixel, l'indice inferiore P l'attuale pixel del bordo, e l'indice inferiore B è il precedente pixel del bordo.

Siccome ci potrebbe essere una stretta relazione tra il gap reale ed il gap misurato per la saldatura profonda, per identificare la relazione, sono state prese in considerazione le distribuzioni di temperatura attorno al giunto in quanto costituiscono un'informazione preziosa. In particolare, tale distribuzione di temperatura è stata ottenuta utilizzando una corrente di saldatura di 180 A, un voltaggio di 20V ed una velocità di avanzamento della torcia di 2,1mm/s utilizzando il programma FEM sviluppato per uno studio precedente.

La Figura 4.28 mostra la distribuzione di temperatura, detta prima, riportando solo metà giunto per diversi gap.

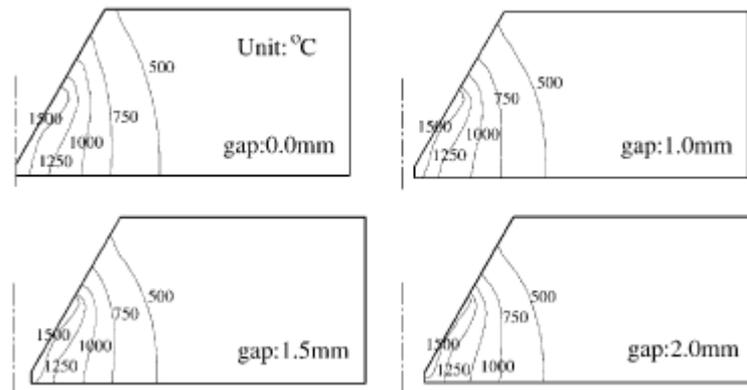


Figura 6.28 – Distribuzioni di temperature per differenti grandezze del gap

La regione riscaldata oltre i 1500°C può essere considerata essere una parte del bagno di saldatura, e la larghezza dell'intera regione è il gap misurato in questo studio.

Con i risultati ottenuti, si può stimare la relazione tra il gap attuale ed il gap misurato, relazione che è stata anche confermata e quantificata attraverso una serie di esperimenti di saldatura ed il risultato è mostrato nella Figura 4.29.

Il gap reale può allora essere ottenuto a partire dal gap misurato.

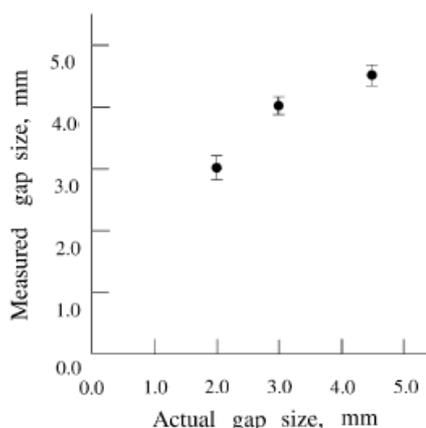


Figura 6.29 – Confronto tra la grandezza del gap attuale e del gap misurato

Per sviluppare ulteriormente la relazione tra la grandezza del gap e la velocità di saldatura è stato proposto un controller con *logica fuzzy* di cui si riporta nella Figura 4.30 il diagramma a blocchi.

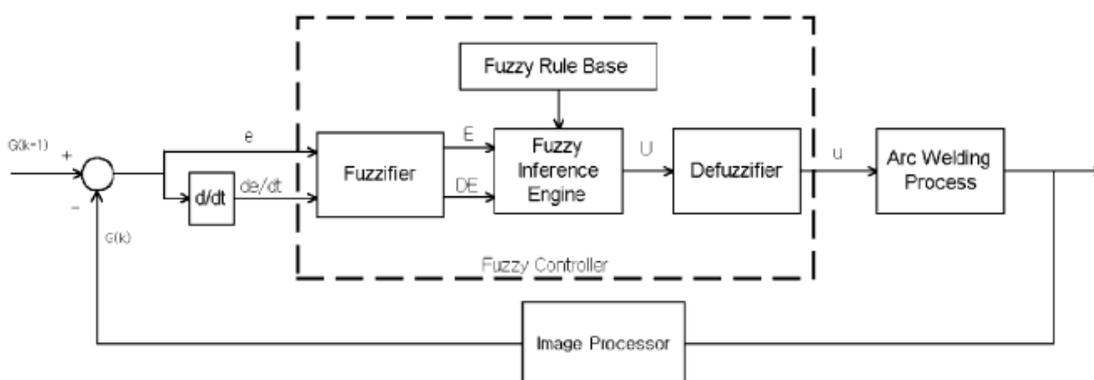


Figura 4.30 – Diagramma a blocchi del controller fuzzy

La *logica fuzzy* proposta prende in considerazione due variabili: $(e(k))$, che è la differenza tra il gap $(G(k))$ al tempo (k) ed il gap di riferimento $(G(k-1))$ al tempo precedente $(k-1)$, e $de(k)/dt(\Delta e(k))$. Le seguenti conoscenze sono utilizzate per determinare una nuova velocità di saldatura.

1. Se il gap è piccolo ($e(k)>0$) e diventa più piccolo ($\Delta e(k)>0$), allora si fissa una velocità molto più alta ($u \gg 0$)
2. Se il gap è grande ($e(k)<0$) e diventa più grande ($\Delta e(k)<0$), allora si fissa una velocità molto più bassa ($u \ll 0$)
3. Se il gap è grande ($e(k)<0$) e diventa più piccolo ($\Delta e(k)>0$), allora si fissa una velocità molto più bassa ($u < 0$)
4. Se il gap è piccolo ($e(k)>0$) e diventa più grande ($\Delta e(k)<0$), allora si fissa una velocità molto più bassa ($u > 0$)

Esperimenti di saldatura sono stati condotti per valutare la fattibilità in controllo automatico del processo di saldatura della *passata di base* di un tubo di acciaio avente un diametro di 192mm ed uno spessore di 15mm. Per effettuare la saldatura sono stati utilizzati due tubi, ognuno dei quali lungo 150mm e rifiniti ad una estremità, appuntati in 4 posizioni a 90° con una saldatura di 10mm in ogni posizione. Inoltre per effettuare la saldatura sono stati utilizzati un filo per la saldatura SM70 avente un diametro di 1,2mm ed un gas di protezione costituito al 100% da CO₂.

In definitiva, in questo studio è stato proposto un sistema di percezione visivo per il rilevamento del giunto ed il controllo del bagno di saldatura per automatizzare la *passata di base* nella saldatura di tubi di acciaio. Come risultato dello studio di fattibilità fatto attraverso una serie di esperimenti di saldature per il sistema proposto si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. Il manipolatore con il meccanismo di afferraggio della torcia lavora posizionando esattamente la torcia al punto iniziale della saldatura per ogni specifico diametro del tubo.
2. Si utilizza la tecnica della *piccola rilevazione*, cioè la videocamera ed la frame grabber acquisiscono l'immagine del bagno solo quando si verifica

il corto circuito e quindi l'arco è estinto evitando interferenze provocate da quest'ultimo.

3. La posizione del filo, il centro del bagno, e la grandezza del gap possono essere calcolati analizzando le caratteristiche percepite dall'immagine del bagno
4. La logica fuzzy può determinare in tempo reale la velocità di saldatura ottimale corrispondente alla variazione del gap.

6.2 – Inseguimento automatico per un robot di saldatura per giunti di forme libere con l'utilizzo di un sensore di visione laser

La saldatura ad arco robotizzata nel processo di manifattura automatico è stata largamente utilizzata e studiata. Per localizzare la precisa posizione del giunto, sono stati usati vari sistemi di sensori. In particolare il sistema di luce strutturata, che fornisce la gamma-dati dal pezzo di lavoro, è stato usato per determinare la traiettoria del robot di saldatura. I metodi della generazione del percorso del robot, che usano il sistema strutturato della luce, sono principalmente applicati per il monitoraggio del giunto in tempo reale e nella programmazione off-line basata sui dati di CAD.

Smati, Clocksin e Agapakis hanno proposto l'algoritmo per la ricognizione del giunto dalla gamma dati del pezzo di lavoro e lo hanno applicato al giunto di saldatura.

Ciascuno di questi metodi hanno usato soltanto la posizione dei giunti per la generazione della traiettoria e non hanno considerato l'orientamento del robot.

Pertanto tali metodi presentano delle limitazioni se applicati a giunti distorti come nelle forme libere.

Sugitani e Kim hanno proposto metodi di programmazione del robot che correggono i dati del CAD trovando la posizione di inizio e fine della giuntura tramite il sensore dell' arco e il sistema di luce strutturato e li hanno applicati nel tratto della linea del giunto. In modo analogo tali metodi non considerano l' orientazione del robot.

Parliamo ora di un metodo di programmazione del robot di saldatura nel quale i dati CAD e la gamma dati acquisiti dal sensore di visione laser, il quale e' una specie di sistema si luce strutturata, sono combinati e applicati alla saldatura robotica di giunti di forme libere. La gamma dati del pezzo di lavoro al sensore di visione laser e' stata ottenuta dalla traiettoria del robot, il quale e' stato prodotto attraverso i dati CAD, un modello geometrico come la traiettoria e il giunto sono stati usati non solo per determinare la posizione ma inoltre per determinare l'orientazione della torcia, generando così una traiettoria ottimale, che considera un sistema di errori causati dal posizionamento e dalla manifattura del pezzo di lavoro nella linea di processo.

Il sensore di visione del laser del tipo luce strutturata e' stato usato per l'acquisizione della gamma dati del pezzo di lavoro. Il sensore di visione del laser è composto da un diodo laser, una lente cilindrica, e una camera CCD come mostrato in figura 4.1(a):

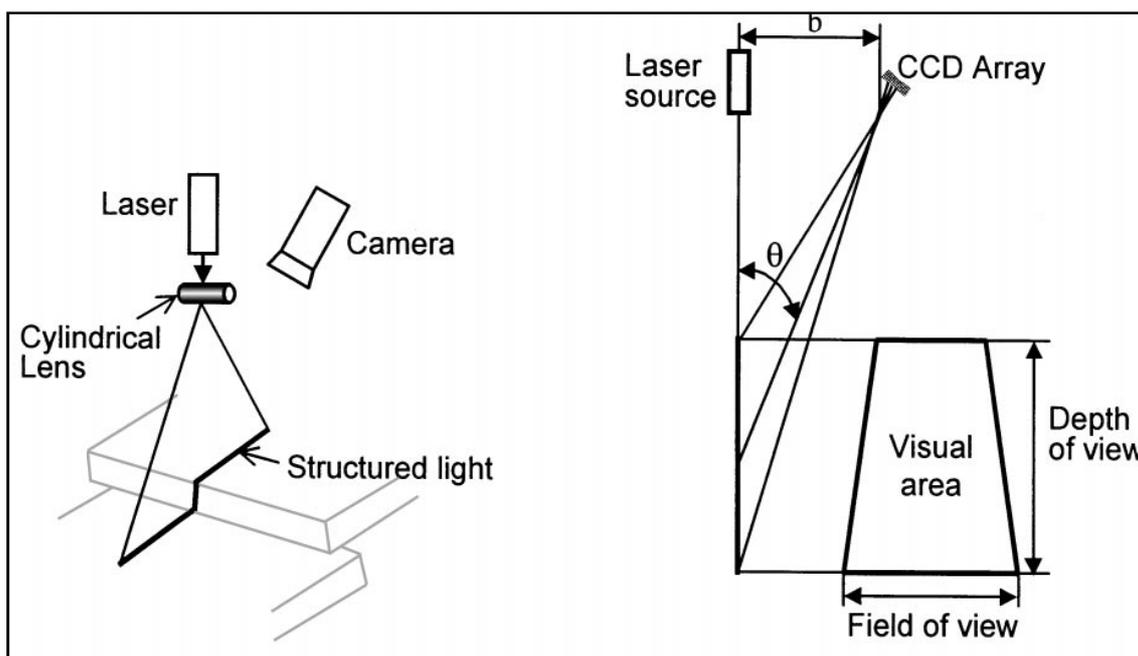


Figura 6.1(a) – Principio della luce strutturata

Figura 6.1(b) – Geometria del sensore di visione laser

La luce strutturata generata dalla lente cilindrica è proiettata sull' oggetto. La camera cattura le immagini e la gamma dati dell' oggetto è prodotta da un principio di triangolazione.

La zona visiva e la risoluzione del sensore di visione del laser sono determinate dalla geometria tra il laser e la camera CCD come mostrato in figura 4.1(b). dopo un'accurata procedura di calibrazione tra il sensore di visione del laser e il robot, la gamma dati acquisita dal sensore può essere descritta dalla struttura di coordinate del robot. Il sistema di insegnamento automatico comprende il robot articolato su sei assi, il sensore di visione del laser, la saldatrice e un computer remoto come mostrato in figura 4.2. La gamma dati

acquisita dal sensore di visione del laser è trasferita al computer remoto tramite BUS e il sistema robot è collegato al computer remoto tramite la RS-232c.

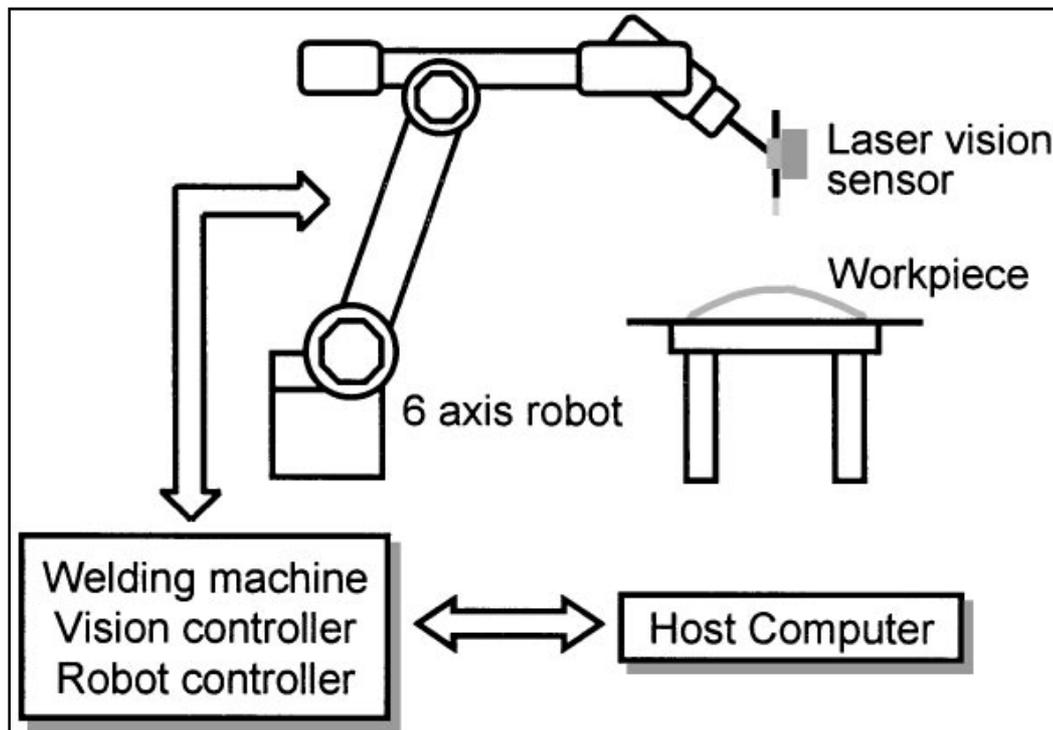


Figura 6.2 – Configurazione del sistema per l'insegnamento automatico del robot di saldatura

L'elaborazione dei dati per l'insegnamento automatico, consta di tre passi come mostrato in figura 4.3. La scansione del percorso per l'acquisizione della gamma dati è stata generata a partire dai dati CAD del pezzo in lavorazione. Il sensore di visione del laser acquisisce i dati sequenziali ed è creato un modello geometrico. Il percorso del robot generato dal modello geometrico, è trasferito al controller del robot e la saldatura è eseguita.

La scansione della traiettoria del sensore di visione del laser per l'acquisizione della gamma dati abbiamo detto è generato dai dati CAD del pezzo in lavorazione. Poiché una causa frequente di errore è causata dalla posizione errata del pezzo di lavoro, la scansione è effettuata diagonalmente dall'inizio alla fine della giuntura come mostrato in figura 4.4. Nella zona della giuntura, la scansione è fatta lungo i dati CAD, nel quale il centro del campo di visibilità del sensore

è equivalente alla giuntura dei dati CAD, in modo tale da considerare gli errori.

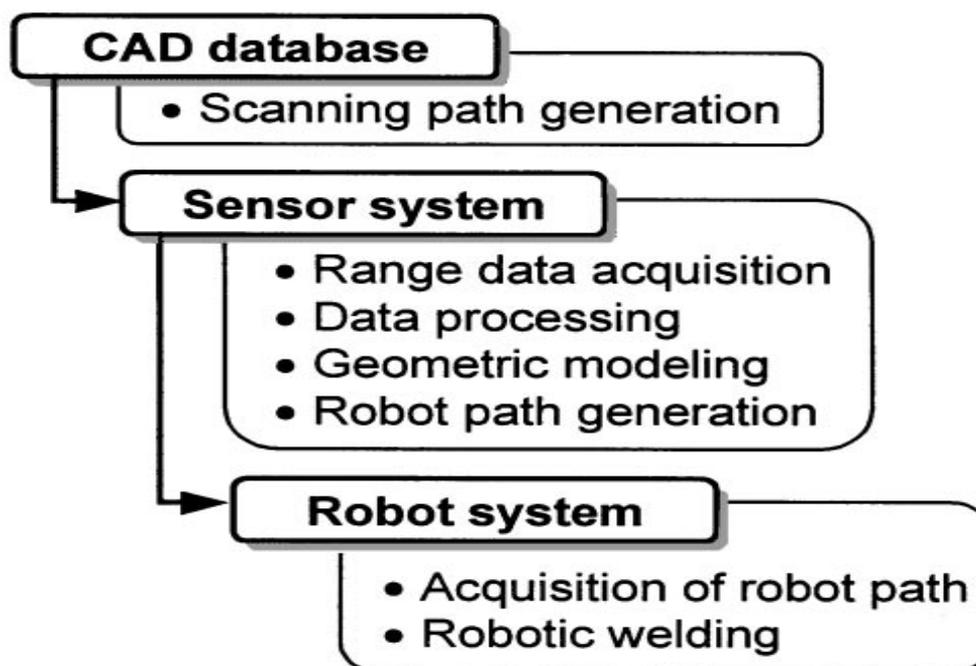


Figura 6.3 – Diagramma algoritmico del sistema di insegnamento automatico

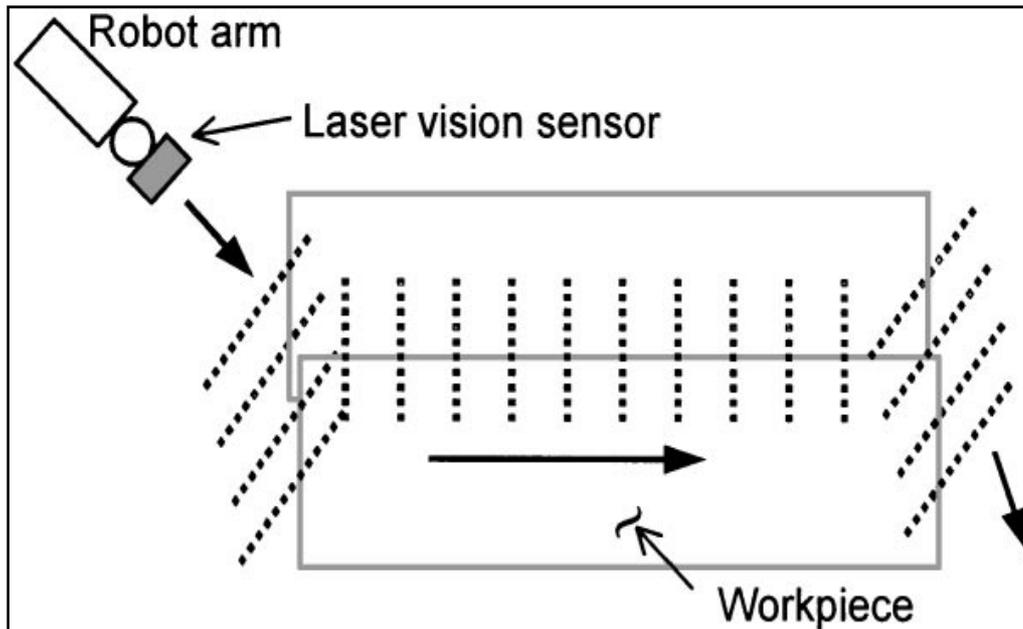


Figura 6.4 – Percorso di scansione per l'acquisizione della gamma dati

Per quanto concerne la funzione di filtraggio c' è da aggiungere che la gamma dati contiene il disturbo così come i dati del pezzo di lavoro. Poiché i disturbi della gamma dati sono dominanti nelle zone ad alta frequenza, la gamma dati che non soddisfa l' Eq. (4-1) in particolari condizioni è considerata come un disturbo e quindi rimossa.

$$\mu - 3\sigma < z < \mu + 3\sigma \quad (4-1)$$

Nella Eq. (4-1), z è l' altezza della gamma dati in altezza, μ è il valore medio della altezza della gamma dati e σ è la deviazione standard. Dopo il filtraggio del disturbo, la caratteristica di estrazione viene eseguita utilizzando un' algoritmo di scambio (**ESA**) e la gamma dati è separata nelle linee segmento.

ESA è un' efficiente algoritmo di rappresentazione polilinea per curve planari, dove per polilinea si intende una sequenza di segmenti di linea uniti fino alla fine.

I punti in cui i segmenti di linea sono uniti, diventano punti di riferimento e da questi la gamma dati è semplificata. In figura 4.5 sono mostrati i risultati della applicazione dell' ESA dalla gamma dati di un giro comune.

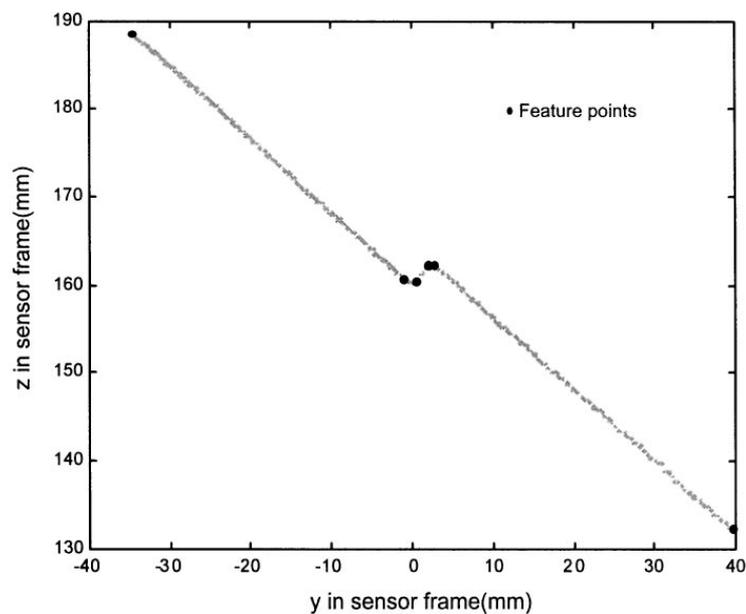


Figura 6.5 – Caratteristica di estrazione per la gamma dati di un giro comune

Il giunto è definito dallo spessore del pezzo di lavoro e dall'angolo tra i due pezzi di lavoro. Pertanto, la lunghezza di un segmento di retta e l'angolo tra le due linee segmenti, diventano i principali parametri di riconoscimento del giunto. I margini delle giunzioni sono definiti dai valori normalizzati di questi parametri e la modellazione del giunto è eseguita da uno schema riconoscimento-margine. La distanza assoluta tra la predefinita sagoma del giunto e le dimensioni reali sono calcolate come segue:

$$d = \sum_{i=0}^n |f_i - T_i| \quad (4-2)$$

dove \mathbf{f} è la configurazione reale del vettore, \mathbf{T} è il vettore di sagoma (template vector) e \mathbf{n} è il numero di componenti del vettore di sagoma. La più piccola distanza calcolata con l'Eq. (4-2), restituisce il migliore risultato, e il riconoscimento della giunzione.

La giunzione è modellata in una serie di tre punti, che descrivono i due punti del bordo del pezzo di lavoro tanto bene quanto un punto di monitoraggio del giunto. I due punti bordo del modello di giunzione, offrono maggiori informazioni per determinare l'orientamento della torcia.

Se una giuntura è rettilinea, o l'intervallo di scansione è molto piccolo, è possibile modellare la giuntura in una linea. Diversamente, il modello di linea della giunzione, ha delle limitazioni in applicazioni di forme libere, giunture molto distorte e circolari. Al fine di risolvere tali problemi, la giuntura, è modellata su una scanalatura cubica, che è una specie di curva tridimensionale. La curva di scanalatura cubica è determinata dai vettori posizione e tangente di fine punto di ogni segmento e la sua funzione parametrica ha la seguente forma:

$$\mathbf{P}(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(0) \\ p(1) \\ p'(0) \\ p'(1) \end{bmatrix}, 0 \leq t \leq 1 \quad (4-3)$$

Se gli n punti sono interpolati, i vettori tangenziali interni della scanalatura cubica sono ottenuti usando la continuità della derivata seconda come segue:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 1 & 4 & 1 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p'0 \\ p'1 \\ p'2 \\ \dots \\ p'n-2 \\ p'n-1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'0 \\ 3(p2 - p0) \\ 3(p3 - p1) \\ \dots \\ 3(pn-1 - pn-3) \\ p'n-1 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Dalle equazioni (4-3) e (4-4), il modello di saldatura è ottenuto usando il monitoraggio di punti che sono stati forniti dal modello di giunzione. La figura 4.6 mostra i risultati del modello di saldatura partendo dal modello di giunzione citato.

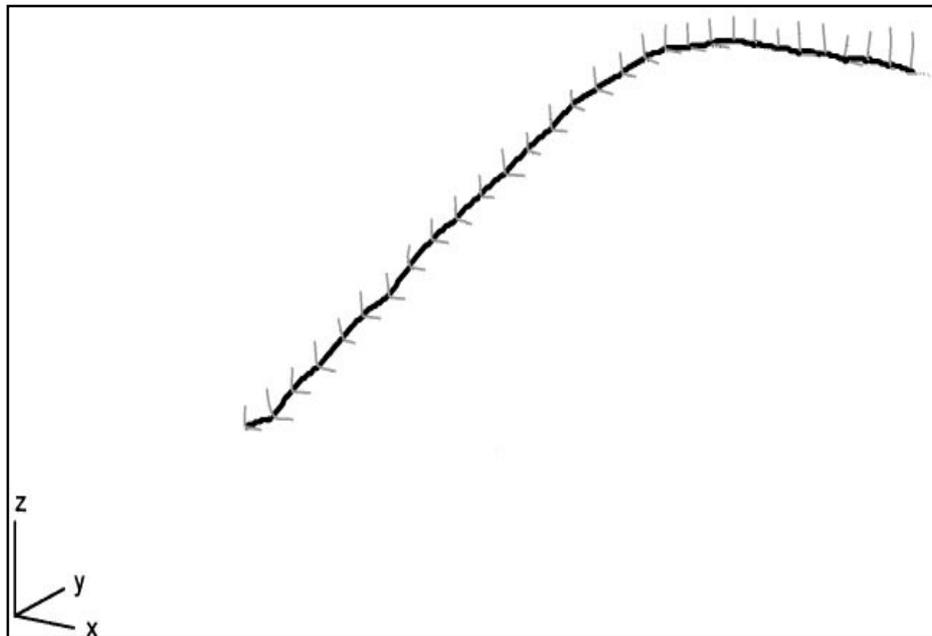


Figura 6.6 – Modellazione di saldatura usando il cubic spline

I punti di partenza e arrivo della giuntura sono determinati tramite la linea modello del margine del pezzo di lavoro, il modello piano del tavolo di lavoro e il modello del giunto.

Il modello piano del tavolo di lavoro, è una funzione implicita della seguente forma:

$$a^t p = 1. \quad (4-5)$$

Il modello piano è usato per segmentare la gamma dati nel pezzo di lavoro e nel tavolo di lavoro. La gamma dati riscontrata al piano, rappresenta il tavolo di lavoro, e la gamma dati connessa al modello piano, descrive il bordo del pezzo di

lavoro. L'equazione della linea, rappresentata dal bordo del pezzo di lavoro è una funzione parametrica della seguente forma:

$$P(t) = \begin{bmatrix} ax & bx \\ ay & by \\ az & bz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ 1 \end{bmatrix} \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (4-6)$$

Dove t è il parametro calcolato con l'approssimazione della lunghezza della corda della gamma dati, e le incognite sono calcolate con il metodo dell'errore del quadrato più piccolo.

La figura 4.7 mostra il risultato dell'ispezione dell'inizio giuntura, attraverso un modello di quattro linee del bordo del pezzo di lavoro.

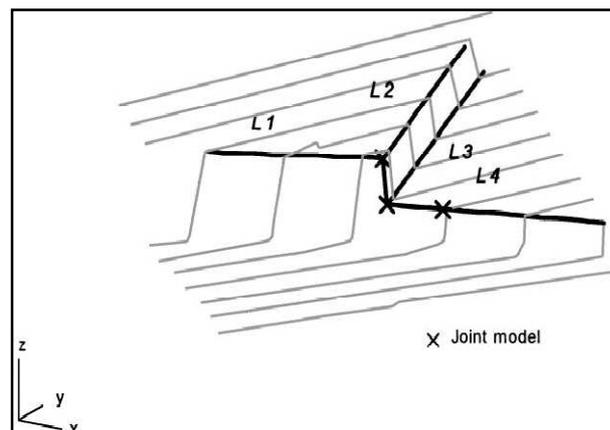


Figura 6.7 – Modello per la ricerca del punto di inizio giunzione

La posizione e l'orientazione del robot di saldatura può essere estratta dal modello geometrico dell' oggetto. La posizione e la direzione del movimento del robot, sono calcolate dal modello della giuntura. La posizione del robot è la posizione del vettore cubic spline dell' Eq (4-3) e l' orientazione del vettore descritta dalla direzione di movimento del robot , è calcolata dalle derivate del parametro t :

$$\mathbf{O} = \left(\frac{\partial px}{\partial t} \mathbf{i} + \frac{\partial py}{\partial t} \mathbf{j} + \frac{\partial pz}{\partial t} \mathbf{k} \right) / \left| \frac{\partial px}{\partial t} \mathbf{i} + \frac{\partial py}{\partial t} \mathbf{j} + \frac{\partial pz}{\partial t} \mathbf{k} \right| \quad (4-7)$$

Se il modello del giunto è rappresentato da due vettori, (v_1 , v_2) con origini coincidenti, l' approccio vettoriale del robot, che è normale alla giuntura, è determinato dalla somma dei due vettori del modello di giunzione. La somma dei due vettori, è data da:

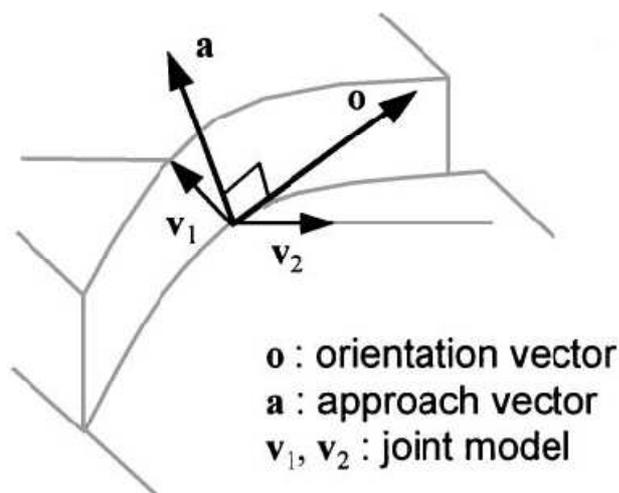


Figura 6.8 – Modello di giunzione e orientazione del robot

$$\mathbf{b} = \frac{V1 + V2}{|V1 + V2|} \quad (4-8)$$

L' approccio vettoriale è calcolato come segue:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{b} - (\mathbf{b} * \mathbf{o})\mathbf{o}}{|\mathbf{b} - (\mathbf{b} * \mathbf{o})\mathbf{o}|} \quad (4-9)$$

con i vettori \mathbf{a} e \mathbf{b} complanari e i vettori \mathbf{o} ed \mathbf{a} ortogonali. Il vettore normale è dato dal prodotto dei vettori \mathbf{o} ed \mathbf{a} :

$$\mathbf{n} = \mathbf{o} \times \mathbf{a} . \quad (4-10)$$

Dalle equazioni (4-7) e (4-10) che descrivono l'orientamento del robot, è possibile ricavare la posizione del robot.

7.0 SISTEMA DI VISIONE

Sebbene (come visto) studiare un sistema di visione artificiale significa affrontare l'analisi di complessi algoritmi e la costruzione di opportuni linguaggi di programmazione per l'elaborazione dei dati. Si è potuto by-passare tale complicità utilizzando dei programmi presenti in commercio che elaborano algoritmi (precostruiti) relativi ai sistemi di visione. Si sono così usati due programmi della National Instrument (in sigla *NI*): il *Vision Assistant 7.1* (in sigla *VA*), ed il *Vision Builder AI 2.6* (in sigla *VB*), nati per il trattamento e l'analisi delle immagini nel campo dei controlli di qualità (che si ricorda, è praticamente il principale settore in cui si applicano i *SV*), programmi scelti anche perchè si interfacciano perfettamente con un altro programma della *NI*: il *LabVIEW 8.0* (in sigla *LV*) usato per la movimentazione dei motori passo-passo (di cui si parlerà nella parte successiva). Esistono comunque anche altri software utilizzabili, tanti quanti sono le realtà industriali che producono i *SV*. E' stato provato allora anche il programma "Checker" della Cognex, pervenendo così dal confronto, al limite di tutti i pacchetti applicativi, che nascendo per specifiche attività industriali sono quindi difficilmente adattabili ad applicazioni personalizzate non previste in partenza.

Software

Mentre in passato si era obbligati a fare una netta distinzione tra:

- *sistemi solo configurabili* (firmware a bordo, scelta di algoritmi da una lista fissa), e
- *sistemi solo programmabili* (sviluppo dell'eseguibile a partire da librerie, fino allo sviluppo di algoritmi ad hoc),

sono ora presenti sul mercato anche sistemi che permettono il transito dal configurabile (che implica il miglior rapporto prezzo/prestazione) al programmabile (che garantisce la massima flessibilità e possibilità di upgrade).

Tool

Il vantaggio fondamentale nell'uso dei software di visione artificiale, è la presenza dei *tool* per la localizzazione e l'analisi di pezzi e particolari nell'ambito del campo visivo della telecamera. Ciò costituisce il primo approccio a qualsiasi applicazione di visione (dalla più semplice operazione di *pick-and-place* alla più complessa funzione di verifica dell'assemblaggio). Va ricordato che sebbene possa apparirci piuttosto semplice, la localizzazione di pezzi negli ambienti di lavoro, ciò può risultare estremamente difficile per i sensori di visione, dal momento che esistono molte condizioni variabili suscettibili di alterare il modo in cui un pezzo viene percepito dal sistema, che è programmato al riconoscimento sulla base di un riferimento o di un modello di immagine del pezzo stesso.

Si riportano ora in dettaglio le cause di variabilità dell'informazione video durante il processo di acquisizione, e quindi a cosa bisogna fare attenzione nell'allestimento dell'impianto:

- rotazione del pezzo a causa di vibrazioni o allentamento del sistema di fissaggio;
- variazioni della scala ottica, ossia variazione della distanza tra telecamera e pezzo;
- sfocatura per cattiva regolazione delle ottiche della telecamera o per sporcizia delle stesse;
- contrasto insufficiente poiché o il pezzo si confonde con lo sfondo o i contorni di esso sono poco definiti;
- condizioni di illuminazione inadeguata o variabile magari a causa della luce solare esterna;
- riflessi;
- ombre causate dal passaggio sopra il sistema di oggetti (come ad esempio nel nostro caso la bocca dell'aspiratore dei fumi di saldatura o i carroponte nelle fabbriche);
- sovrapposizione del pezzo;
- vibrazione causata dai motori durante la movimentazione;
- variazioni normali dell'aspetto del pezzo.

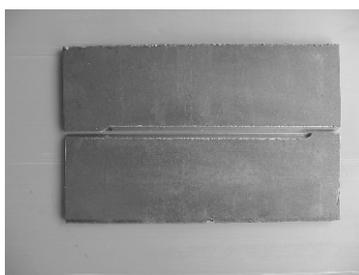
Manipolazione dell'immagine

L'immagine sorgente, o il video (che viene trattato dal sistema di visione come una sequenza temporale di immagini), rappresenta l'elemento fondamentale per il sistema di acquisizione, è chiaro quindi che quanto più alta è la risoluzione della videocamera, tanto più semplice risulterà l'individuazione da parte del sistema dei template per il matching (il *template* rappresenta l'immagine campione di riferimento per le operazioni confronto (*matching*)). Unico svantaggio dell'elaborazione di immagini ad alta definizione, è costituito dall'appesantimento delle operazioni di calcolo del sistema, e praticamente se si usa solo un comune *PC* senza schede *frame grabber* per elaborazione immagini, diventa allora impossibile acquisire anche a partire da un formato 1600 x 1200 a 4.0 Megapixels e 32-bit *RGB* che è quello di una media video-fotocamera digitale.

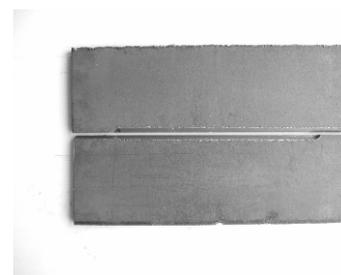
L'immagine sorgente in genere deve essere elaborata per poter essere trattata dai sistemi di visione, i cui algoritmi sono perlopiù stati pensati per applicazioni su immagini ad 8-bit. In questa fase non bisogna pensare a quello che si vedrà come risultato dell'elaborazione, ma piuttosto considerare come utilizzare l'immagine elaborata e come può risultare più semplice al *SV* il riconoscimento di dettagli. Si riporta così un'immagine ripresa con una videocamera con formato 1600 x 1200 a 32-bit, e vediamo come si presenta dopo le diverse elaborazioni:



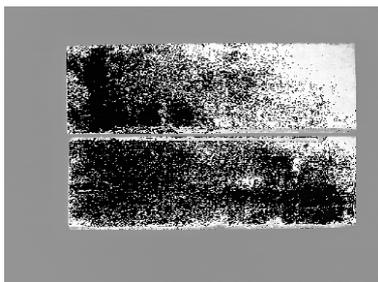
Immagine sorgente



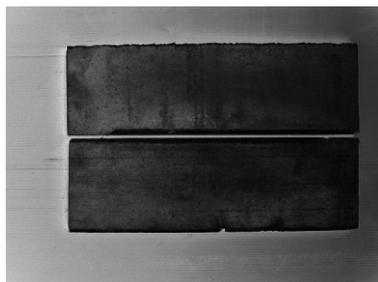
HSI Intensity- plane



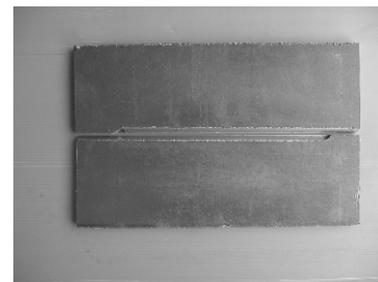
HSV Value-plane



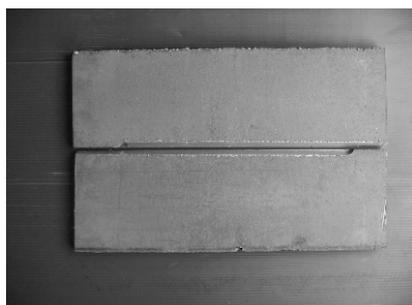
HSL Hue-plane



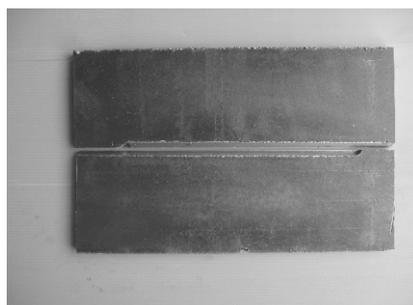
HSL Saturation-plane



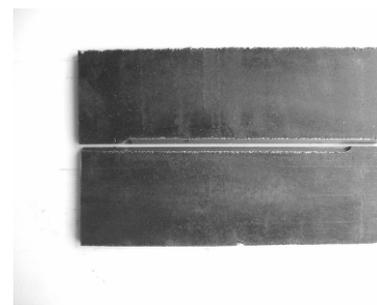
HSL Luminance-plane



RGB Red-plane



RGB Green-plane



RGB Blue-plane

Grazie a questo passaggio si estrae dall'immagine sorgente che è combinazione di tre ($3 \times 8 = 24$ -bits) o quattro ($4 \times 8 = 32$ -bits) piani immagine, un solo piano, potendo così elaborare appositi algoritmi funzionanti solo su immagini ad 8-bits.

È l'estrazione dei piani *HSV* - Value plane o *RGB* - Blue plane che si prestano meglio al sistema di visione per l'applicazione successiva di misurazione delle dimensioni delle piastre.

Immagini binarie.

Vi sono anche algoritmi che utilizzano immagini binarie come il *Basic*, il *Morphology*, l' *Adv*, il *Particle Filter* e l' *Invert Binary Image* (analizzati in dettaglio più avanti), ed allora, volendoli usare, si dovrà trasformare l'immagine sorgente in immagine binaria, ovvero passati al formato ad 8-bits si deve compiere l'operazione di *Threshold* (marginatura), cosa però possibile solo quando si ha un'immagine che si distingue perfettamente dallo sfondo e di cui non siamo interessati ai dettagli sulla sua superficie.

Istogrammi.

Di seguito sono riportati i due istogrammi relativi a due strumenti di acquisizione diversi provati sull'impianto in oggetto: una videocamera digitale (1600 x 1200 a 32-bits) ed una webcam (358 x 288 a 16-bits).



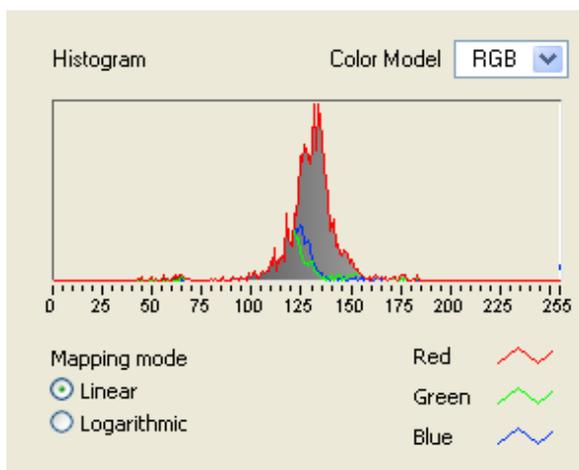


Figura: formato 1600 x 1200 a 32-bits

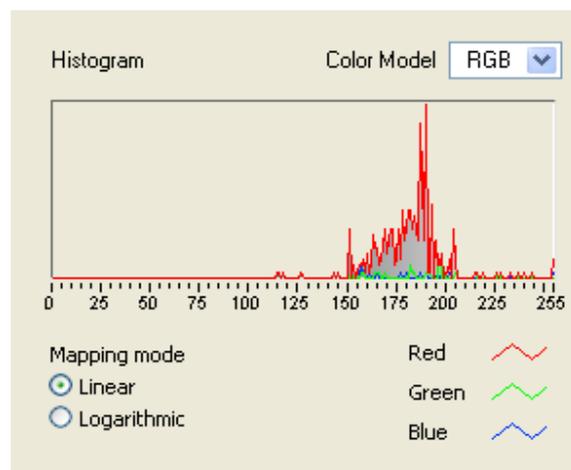


Figura: formato 352 x 288 a 16-bits

La figura relativa alla webcam a destra evidenzia come in questo caso il *SV* acquisisca una immagine tutta sbilanciata nel rosso con le curve del verde e del blu che si confondono e non riescono ad emergere. Questo che sembrerebbe insignificante per l'occhio umano, crea invece grande difficoltà al *SV* per la ricerca e definizione dei bordi (elementi fondamentali da cui partono le misure).

Per l'applicazione in oggetto, si è comunque deciso di utilizzare una comunissima webcam: la QuickCam Express della Logitech avente un formato che arriva fino a 640 x 480 (utilizzando il 352 x 288) a 16-bits color . E' evidente la perdita di risoluzione (e quindi di informazione), ragion per cui si sono dovute escogitare a volte tecniche particolari di riconoscimento, ma si ha il vantaggio di poter lavorare con velocità di calcolo accettabili, ed ottenere una applicazione low-cost così come era stato preposto inizialmente. Va fatto presente inoltre, che il computer utilizzato per il lavoro, deve elaborare contemporaneamente all'immagine acquisita, anche un programma per la movimentazione delle slitte,

cosa possibile grazie al fatto che non si ha bisogno di elaborazioni particolarmente spinte.

Filtri.

Come si è visto, questi preparano l'immagine da processare estraendo solo le informazioni necessarie. La maggior parte di essi fanno uso di un "kernel" ossia di una matrice attraverso cui si definisce una relazione tra il pixel centrale (detto nocciolo) ed i pixels ad esso vicini che sono tanti quanto la grandezza del kernel stesso. A questo punto l'algoritmo suddivide l'immagine in tante piccole regioni di grandezza definita dal kernel, e per ognuna di essa applica le relazioni di vicinato volute.

Gli algoritmi di filtraggio dell'immagine analizzati sono:

- *Smoothing-Lowpass* (Lowpass filtering). Appiattisce l'immagine eliminando dettagli e l'annebbiamento dei bordi.
- *Smoothing-Local Average*. Porta tutti pixels adiacenti al pixel centrale del kernel (pixel nocciolo) ad un valore medio.
- *Smoothing-Gaussian*. Attenua la variazione di intensità luminosa nelle vicinanze dei pixels nocciolo.
- *Smoothing-Median* (Median filtering). Ad ogni pixels viene assegnato il valore medio dei pixels adiacenti.
- *Edge Detection-Laplacian* (Laplacian filtering). Estrae i contorni degli oggetti ed i dettagli caratteristici.

- *Edge Detection-Diff.* (Differentiation filtering). Crea contorni continui accentuando ogni pixel soggetto a variazione di intensità rispetto ai tre pixels in alto a sinistra a lui adiacenti.
- *Edge Detection-Prewitt* (Prewitt filtering), ed *Edge Detection-Sobel* (Sobel filter). Filtro passa alto che estrae i contorni più esterni dell'oggetto.
- *Edge Detection-Roberts* (Roberts filter to detect edges). Delinea i contorni che accentuano pixels dove una variazione di intensità avviene lungo le linee diagonali.
- *Convolution-Highlight Details*. Matrice di convoluzione che accentua i bordi di un'immagine.
- *Convolution-Custom*. Filtro personalizzato che usa una matrice con valori definiti dall'utente.

Contrasto e luminosità.

Per migliorare contrasto e luminosità si possono utilizzare filtri che trasformano il valore della scala dei grigi dell'immagine sorgente.

Usufruento del *lookup table* (insieme di algoritmi) si potrà manipolare l'immagine coi i seguenti comandi:

- *Equalize*: aumenta l'intensità dinamica distribuendo uno specificato intervallo [min, max] di grayscale (scala dei grigi, ciò implica di dover lavorare su di un'immagine a 8-bits) su l'intero grayscale dell'immagine trattata [0,255]. Questo algoritmo di ridistribuzione di intensità di pixels, ha lo scopo di ottenere un istogramma più lineare.

- *Reverse*: capovolge i valori dei pixels, producendo il negativo dell'immagine.
- *Logarithmic*: applica una trasformazione logaritmica (sempre riferita ai pixels) che aumenta luminosità e contrasto nelle zone scure.
- *Exponential*: trasformazione opposta della logarithmic.
- *Square*: operazione simile all'exponential ma con un effetto più graduale.
- *Square Root*: riduce il contrasto nelle zone illuminate (con riflesso ad esempio) come avviene usando il Logarithmic ma con un effetto più graduale.
- *Power X*: riduce il contrasto nelle zone scure.

Se dal formato a 8-bits passiamo poi a quello binario ossia praticamente senza sfumature dei grigi (grayscale), ma solo o “bianco” o “nero” (il bianco è rappresentato per default col colore rosso), perdiamo tutte le informazioni sulle superfici dei pezzi come ad esempio disegni (o graffi), ma potremo utilizzare (per applicazioni specifiche) appositi algoritmi presenti nel: *Binary Basic Morphology*.

Binary Basic Morphology. Opera sulla forma di particolari in immagini binarie. Ogni particolare o regione scelta viene processata su una base individuale. Si possono usare queste funzioni per compiti come espansione o riduzione di oggetti, riempiendo buchi o lisciando confini al fine di delineare oggetti e preparare le immagini per una analisi quantitativa.

- *Erode objects*: elimina pixel isolati nel background (sfondo) ed erode i contorni dell'oggetto basandosi sulla struttura dell'oggetto, così facendo però rende l'oggetto leggermente più piccolo.

- *Dilate objects*: elimina piccoli buchi isolati ed espande il contorno, rendendo l'oggetto leggermente più grande.
- *Open objects*: rimuove piccoli oggetti ed appiana i margini. Questo algoritmo in pratica applica una erosione seguita da una dilatazione che però non altera significativamente l'area o la forma dell'oggetto. I bordi rimossi con l'erosione riappaiono con la successiva dilatazione, ciò però non accade per piccoli oggetti inquadrati nell'immagine.
- *Close objects*: riempie piccoli buchi ed appiana i margini. E' in pratica una dilatazione seguita da una erosione, che non altera in modo significativo l'area dell'oggetto. Gli oggetti vengono espansi con la dilatazione e compressi con la erosione, così i bordi sono lisciati e di buchi riempiti.
- *Proper Open*: rimuove piccoli particolari ed appiana i contorni. È una combinazione duale di closing ed opening.
- *Proper Close*: riempie i buchi ed appiana i contorni interni con una combinazione finita e duale di closing ed opening.
- *Gradient In (Out)*: estrae i contorni interni (esterni) dei particolari.
- *Auto Median*: semplifica gli oggetti in modo da dargli meno dettagli attraverso una combinazione finita e duale di closing ed opening.
- *Thick*: altera la forma degli oggetti aggiungendovi parti che accoppia il modello specificato. L'addensamento è utile per riempire i buchi ed lisciare angoli destrosi lungo i bordi degli oggetti.
- *Thin*: altera la forma dell'oggetto eliminando parti. Lo snellimento (Thinning) è utile per rimuovere pixels isolati nello sfondo e angoli destrosi lungo i bordi degli oggetti.

Binary Adv. Morphology (Advanced Morphology). Compie operazioni di alto livello su particolari di immagini binarie. Utilizzabile per la rimozione di piccoli particolari dall'immagine, l'identificazione di parti o il riempimento di buchi.

- *Remove small objects*: rimuove piccoli oggetti. Un piccolo oggetto è definito dal numero di erosioni specificate necessarie per rimuovere l'oggetto.
- *Removes large objects*: rimuove oggetti grandi. Un oggetto grande è definito dal numero di erosioni specificate che rimuovono l'oggetto.
- *Remove border objects*: elimina i particolari che torcono i bordi di un'immagine.
- *Fill holes*: riempie i buchi trovati in un particolare. I buchi vengono riempiti con un valore in pixel pari a 1.
- *Convex Hull*: Calcola la superficie convessa di oggetti.
- *Skeleton*: Applica una successione di assottigliamenti fino a che l'ampiezza di ogni oggetto uguaglia un pixel. Si suddivide in:
 - 1) The *Skeleton L* function uses an L-shaped structuring element.
 - 2) The *Skeleton M* function extracts the skeleton with more dendrites.
 - 3) The *Skiz* function behaves like the *Skeleton M* function but it affects background regions, rather than object regions.
- *Separate objects*: Interrompe istmi stretti e separa oggetti che si toccano.

- *Label objects*: Produce un'immagine campione che usa valori di grayscale uguali al numero di oggetti nell'immagine più il grayscale 0 usato nell'area di fondo.
- *Distance*: Assegna ad ogni pixel un valore di grayscale uguale alla distanza più corta dal bordo dell'oggetto come potrebbe essere un buco all'interno dell'oggetto.
- *Danielsson*: Crea una mappa di distanza simile alla funzione di Distanza. Danielsson usa un algoritmo più accurato di quello Distance.
- *Segment image*: Suddivide un'immagine in intervalli, ognuno centrato su un oggetto, così che gli intervalli non ricoprono o lasciano zone vuote.

Bisogna dire che l'uso dei filtri richiede molta esperienza da parte dell'utente, e un buon risultato ai fini dell'utilizzazione voluta, implica una corretta illuminazione (uniformemente distribuita) ed una attenta messa a fuoco della videocamera.

Nelle prove sperimentali si è potuto verificare il vantaggio dell'uso dei filtri in un task di ricerca e posizionamento delle piastre sulla griglia di lavoro, in cui a causa di illuminazione non omogenea, e background non chiaramente distinguibile, non si riusciva a creare un template sempre riconoscibile.



Filtrando ed elaborando l'immagine sorgente come nella figura precedente, si è ottenuto un'immagine facilmente distinguibile per il SV, e si è reso il task di ricerca e posizionamento piastre robusto ai problemi di illuminazione e background.

Calibrazione.

Per effettuare la misurazione dimensionale dei pezzi posizionati sulla griglia della saldatrice, con la massima precisione ottenibile da un SV (decimi di millimetro in genere), è fondamentale partire dalla calibrazione della telecamera saldamente fissata alla struttura e ben messa a fuoco. Tutti i SV infatti elaborando immagini, per default utilizzano come unità di misura i pixels, unità che però può essere agevolmente convertita attraverso l'operazione di calibrazione in un'altra a noi più familiare (ad esempio in mm). Anche in questo caso si sfruttano gli algoritmi presenti nel programma. Il Vision Builder prevede l'uso di quattro metodi atti alla calibrazione, come vediamo nella figura di seguito riportata:

Select Calibration Type

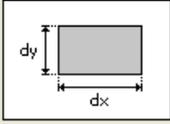
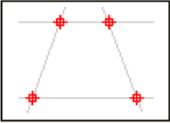
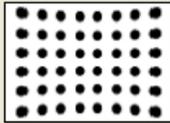
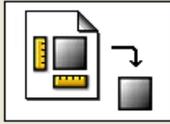
<input checked="" type="radio"/>		Simple Calibration When your camera axis is perpendicular to the image plane and lens distortion is negligible, you can use simple calibration to calibrate your imaging setup. In simple calibration, a pixel coordinate is transformed to a real-world coordinate through scaling in the x and y (horizontal and vertical) directions.
<input type="radio"/>		Calibration Using User-Defined Points To calibrate an imaging setup, the calibration software uses a set of known mappings between points in the image and their corresponding locations in the real world. The calibration software uses these known mappings to compute the pixel to real-world mapping for the entire image. Input a list of real world points and the corresponding pixel coordinates directly to the calibration software.
<input type="radio"/>		Grid Calibration Image a grid of dots similar to the one shown. Input the dx and dy spacing between the dots in real-world units. The calibration software uses the image of the grid, and the spacing between the dots in the grid to generate the list of pixel to real-world mappings required for the calibration process.
<input type="radio"/>		Calibration from Image Set calibrated information from a calibrated image to the current image. Both images must be the same size.

Figura: tipologie di calibrazione adottabili

La precisione ottenibile con l'operazione di conversione è davvero soddisfacente, come si può notare nella figura qui sotto:

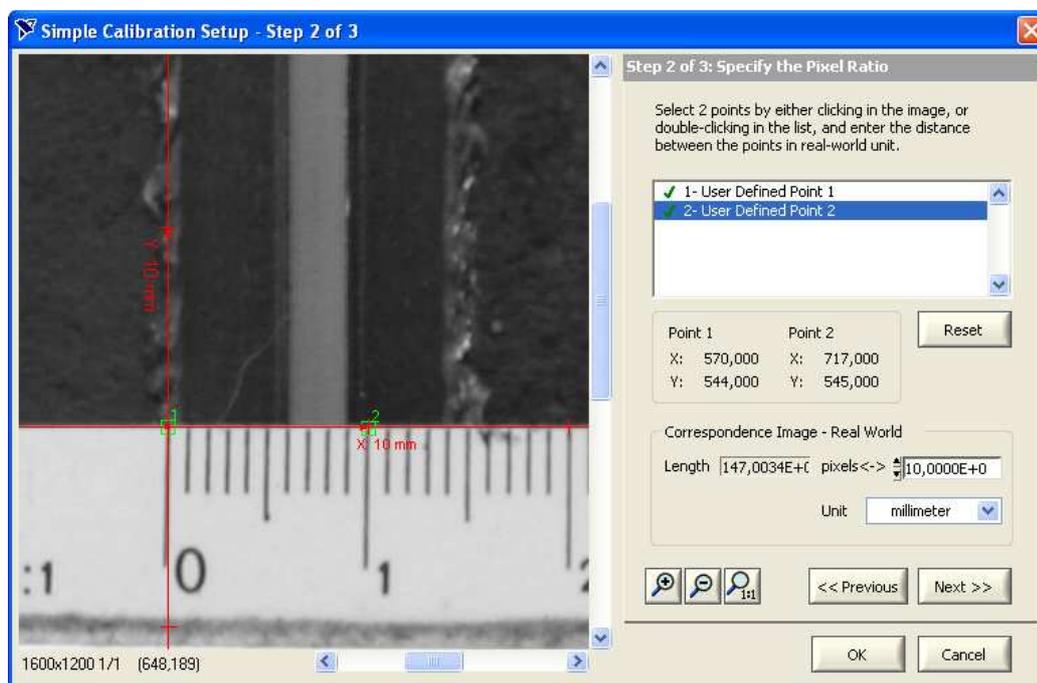


Figura: passaggio da pixels a mm

Da una posizione fissa della telecamera si è allora verificata l'attendibilità della risposta dovuta all'utilizzazione di due sistemi diversi di calibrazione: la *simple-calibration* e la *grid-calibration*.

- *Simple-calibration*: questo metodo fa uso di misure note a priori, e si dimostra ottimo quando l'inquadratura della videocamera è stretta (avviene cioè da una posizione ravvicinata) e non è così evidente la deformazione prospettica.
- *Grid-calibration*: questo metodo viene spesso utilizzato se l'oggetto di osservazione ricade interamente nel riquadro della telecamera (inquadratura larga) che è posta ad una certa distanza da esso essendo così

visibili le deformazioni angolari (*deviazione non lineare*) causate dagli obiettivi.

Per operare con la grid calibration, dopo aver ridotto l'immagine ad 8-bit, bisogna agire sul *thresholds range* (ossia sui margini di soglia) per isolare la griglia (pallini neri) dal background (sfondo bianco), operazione riuscita quando tutti i pallini della griglia sono diventati rossi.

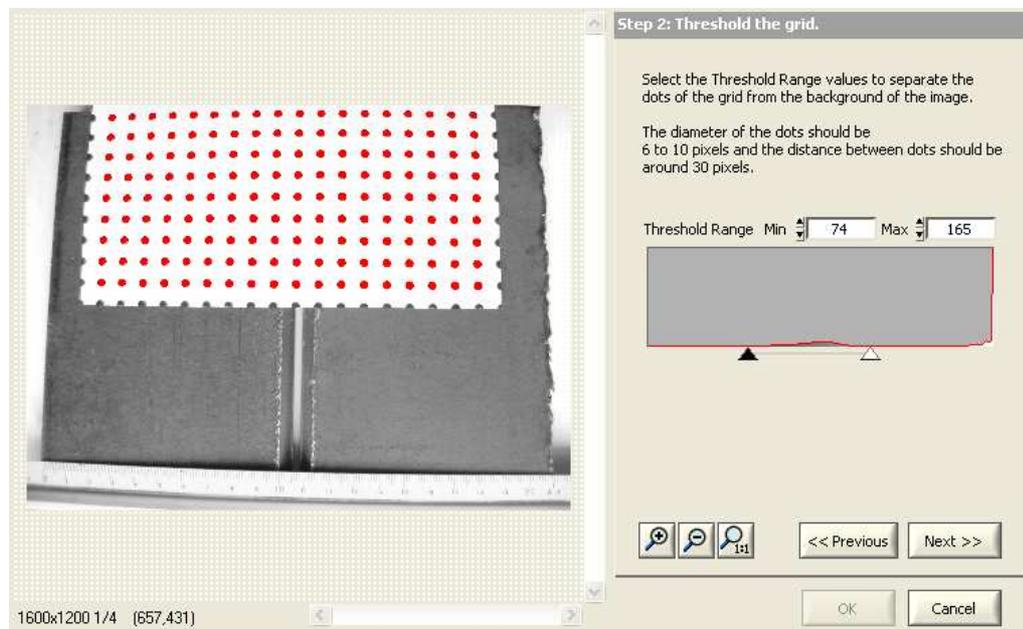


Figura: definizione del threshold range

Si noti il livello di precisione ottenuto con questo metodo:

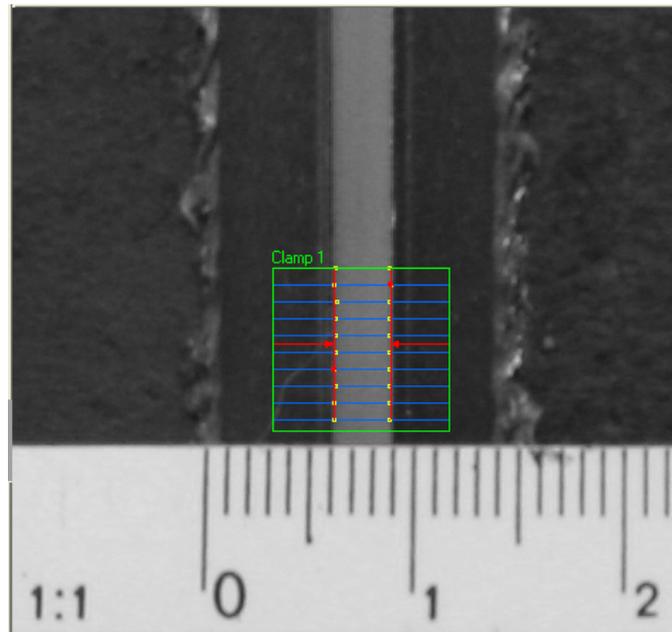


Figura: misura del gap col metodo simple calibration

Utilizzando la grid-calibration si è rilevata una leggera differenza rispetto la simple-calibration dell'ordine di pochi centesimi di mm (2,66 mm a fronte di 2,70 mm).

Misura delle dimensioni delle piastre affiancate.

Attraverso il sistema di visione è possibile la misura delle dimensioni delle piastre affiancate, e del relativo gap (distanza tra le piastre affiancate lungo il cianfrino), con una precisione dell'ordine del decimo di millimetro e con una velocità di elaborazione impressionante ossia 132,968 ms fornitaci dal *benchmark inspection* del Vision Builder.

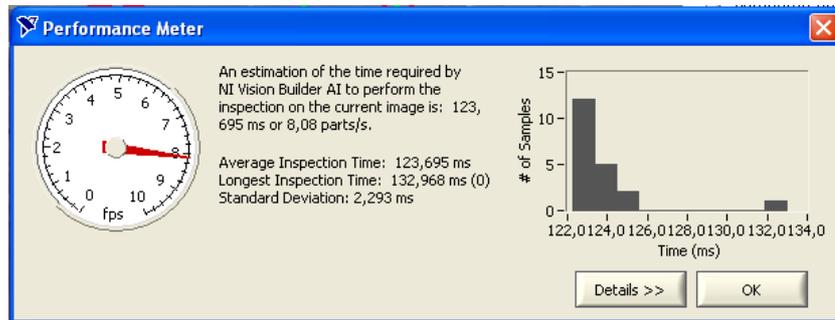
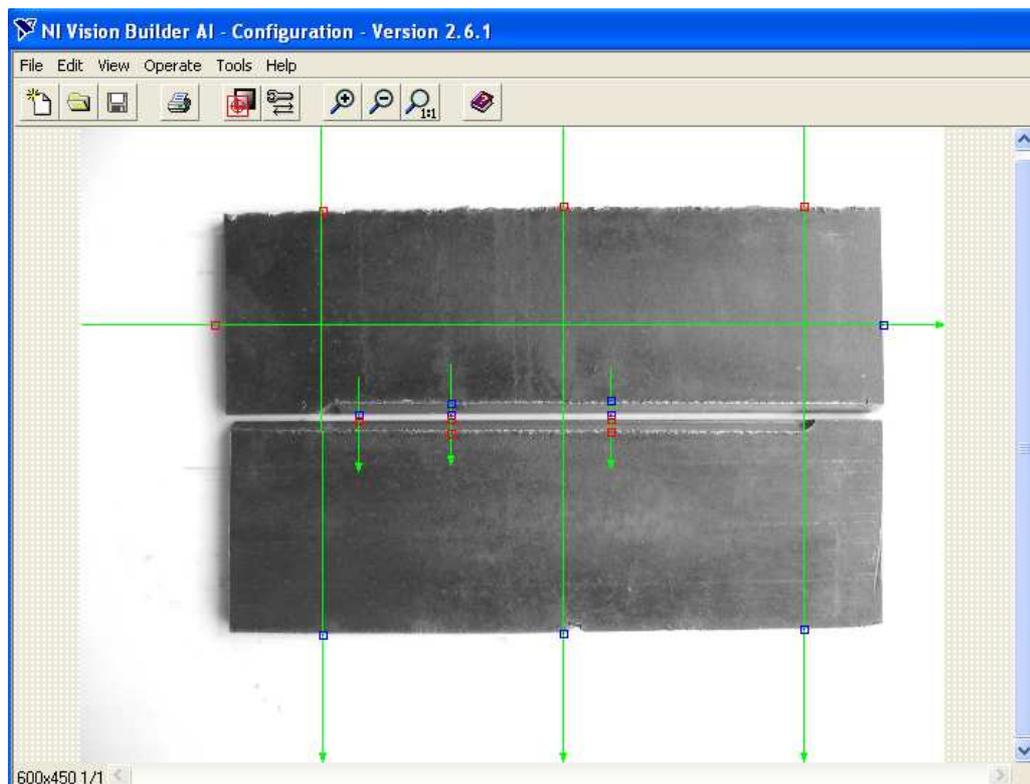
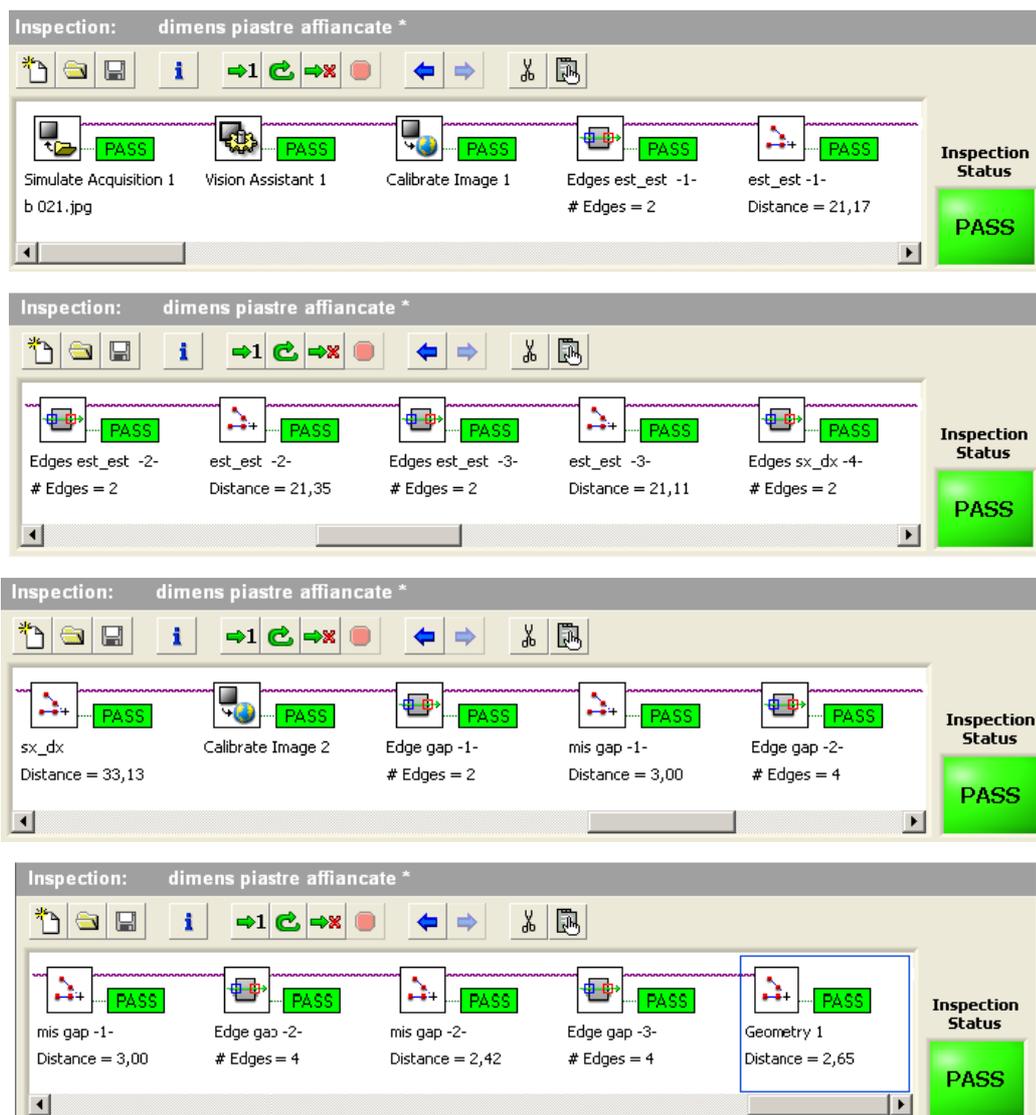


Figura: benchmark (tempo di calcolo richiesto)

Sono riportate di seguito tutte le fasi di elaborazione:





Dalle immagini di sopra che rappresentano l'insieme di tutti gli algoritmi creati, si rilevano le misure effettive delle piastre, ottenute con un grado di imprecisione accettabile (si tenga presente che le piastre sono state tagliate con fiamma ossiacetilenica e quindi presentano il filo del bordo esterno molto irregolare).

Osservazioni.

A conferma della cura che si deve riporre nella creazione di un ambiente strutturato (fondamentalmente ben illuminato), si fanno notare due cose:

- la presenza di una piccola zona in ombra alla sinistra delle piastre influenza la corretta misura della lunghezza delle piastre di circa 2 mm, imprecisione dovuta ad un problema di illuminazione;

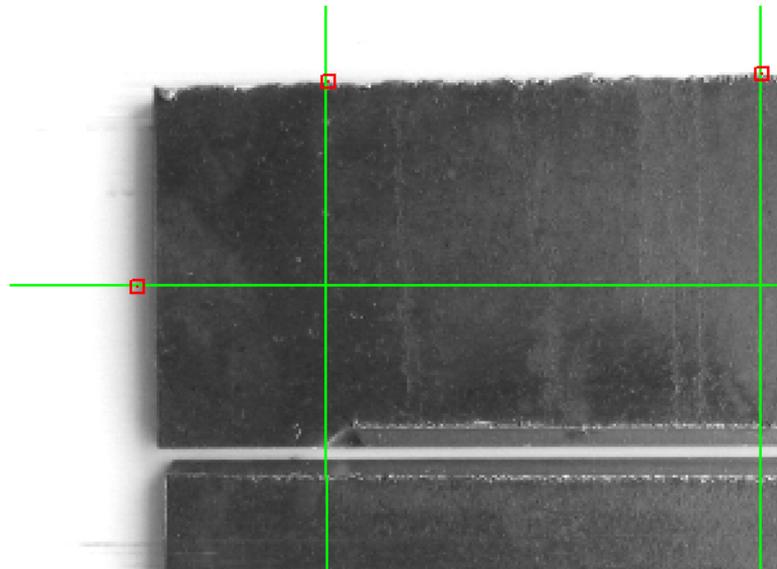
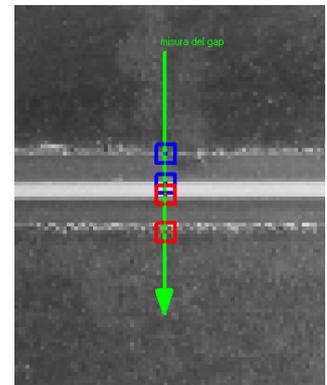
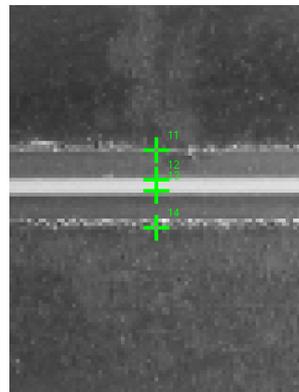


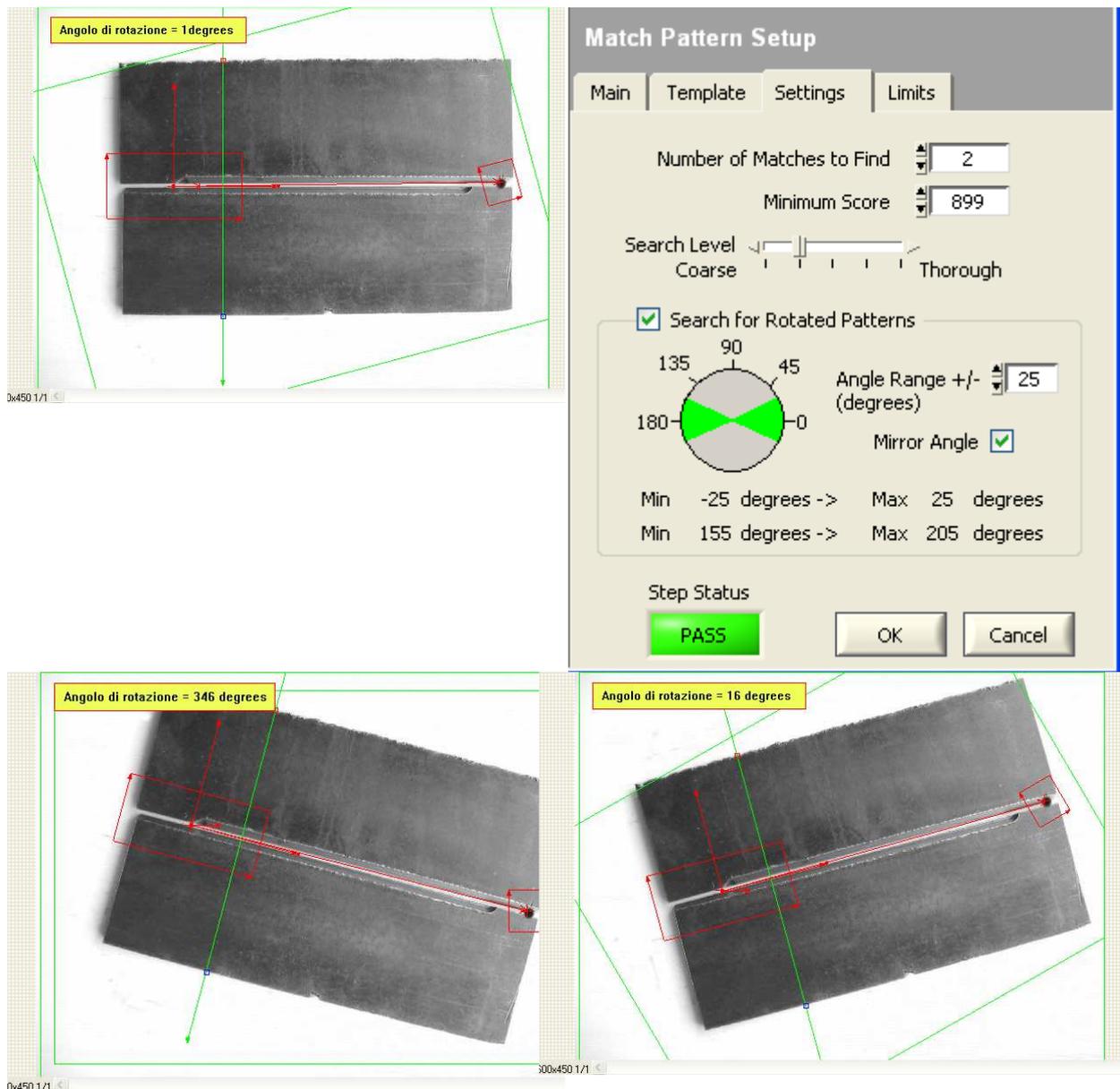
Figura: effetto ombra

- bisogna far attenzione alla scelta dei valori di settaggio degli strumenti di calcolo delle misure (il *Caliper* ed il *Geometry*), che altrimenti non riescono a focalizzarsi sui punti di interesse voluti. Ad esempio per ottenere la misura del gap si è dovuto intervenire sui valori di setting del comando *edges gap -3-* (come si vede nella figura seguente), e selezionare i punti di misura 12 e 13:



Robustezza alla rotazione

Gli algoritmi creati tollerano perfettamente la possibilità di trovare il template ruotato di un angolo qualunque (anche 360°). Essendo questa una situazione possibile nell' applicazione in oggetto, si è verificata la robustezza alla rotazione per due piastre affiancate. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti:



Spesso però risulta conveniente settare il range angolare su valori definiti, per ridurre la quantità di template da riconoscere e limitare la ricerca ad oggetti specifici.

Illuminazione

In commercio esiste una ampia gamma di sistemi di illuminazione che dovrebbero rispondere in modo adeguato alle varie caratteristiche di illuminazione del pezzo, nonché alle condizioni di illuminazione dell'ambiente. Nella gamma dei moduli di illuminazione visti nel corso delle ricerche, hanno riscosso interesse i seguenti:

- *moduli di illuminazione ad anello a neon o a led, particolarmente indicati per una illuminazione pseudoassiale soft da tutte le direzioni:*

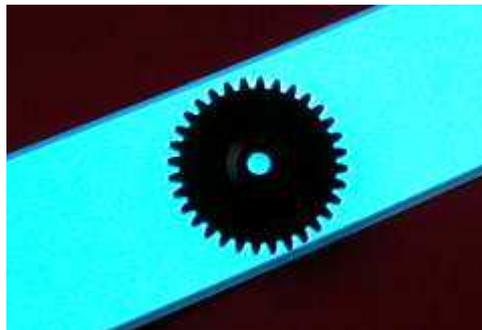


I *led* che hanno grande durata, e luminosità, hanno anche la proprietà di avere una lunghezza d'onda che coincide con il picco di rilevazione della maggior parte delle telecamere in bianco e nero. Inoltre è anche importante che il *coefficiente di*

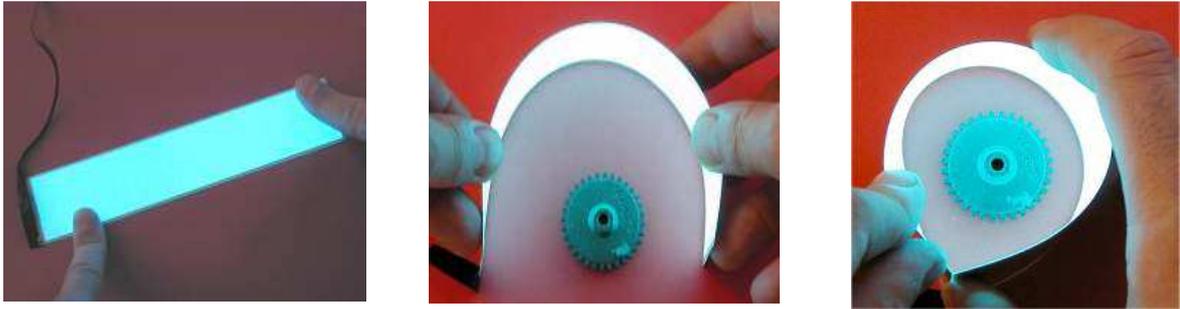
diffusione del led sia elevato in modo da ridurre l'effetto ad anello concentrico tipico di alcuni led. Esistono led a luce colorata utilizzabili per illuminare diverse superfici, operando praticamente come filtri, e led infrarossi che illuminano al buio senza poter essere percepiti dall'occhio umano. Questi ultimi necessitano però di telecamere con sensore infrarosso dal costo lievemente maggiore rispetto quelle normali.

Ci sono poi:

- moduli di *retroilluminazione* per il massimo contrasto tra il pezzo e il suo sfondo;



- *illuminatori elettroluminescenti*, a cui si possono dare svariate forme (vedi figura seguente):



- *illuminatori campo oscuro* che producono un'illuminazione a basso angolo per delineare alcune irregolarità della superficie del pezzo;
- *illuminatori a luce calda*, a raggi UV che riproducono la luce del sole ed altri ancora.

Con questi ultimi si sono ottenuti buoni risultati nella illuminazione delle superfici in visione, che essendo superfici metalliche generano forte riflessione quando sono invece illuminati con luce fredda.



Figura: impianto di sperimentazione, sistema illuminante.

Videocamere

Nel mondo delle videocamere si sta assistendo al declino dell'analogico (per la verità non rapidissimo) a favore dei nuovi standard digitali: *USB2*, *Gigabit Ethernet*, *FireWere (IEEE 1394)* e *Camera Link* e a un generale aumento della risoluzione spaziale dei sensori. Il digitale ha anche contribuito all'adozione di

sistemi a “*intelligenza distribuita*”, trend che è valido anche in altri ambiti quali l’acquisizione dati, il controllo, e la movimentazione multiasse.

Alla famiglia di dispositivi atti all’acquisizione di immagini dal mondo reale, appartengono ancora:

- scanner e
- fotocamere digitali.

Tutti questi strumenti sono accomunati dal fatto che l’acquisizione avviene attraverso un dispositivo elettronico di silicio in grado di tradurre i segnali elettromagnetici (la luce) emessi dagli oggetti in segnali elettrici facilmente manipolabili. Questi sensori sono i già citati *CCD*, i quali variano in base alle loro caratteristiche. Per videocamere e fotocamere è importante saper il numero di pixels che il sensore ottico fisicamente ha poiché, mentre in uno scanner per l’acquisizione di immagini, il sensore scansiona l’immagine un poco per volta fino a che la scansione non è completa, per gli altri due dispositivi si deve avere un sensore in grado di catturare in maniera istantanea e alla risoluzione voluta l’intera immagine.

I parametri fondamentali di cui bisogna tener conto per queste periferiche sono fondamentalmente due: risoluzione ottica e profondità di colore.

Risoluzione ottica. Rappresenta ciò che il sensore riesce a vedere, si misura in *dpi* (dot per inch) ossia punti per pollice che riesce a distinguere e ciò rappresenta la digitalizzazione dell'immagine.

Profondità di colore. Questa caratteristica dipende dalla qualità del *CCD*, maggiore è la profondità di colore e migliore sarà la capacità di distinzione tra sfumature di uno stesso colore e quindi maggiore la precisione del valore numerico assegnatagli. Il numero dei bit che viene usato per rappresentare il colore di un pixel è detto *profondità*. Per esempio se il numero di bit è 16 il *CCD* sarà in grado di distinguere 2^{16} colori.

In generale più l'immagine acquisita è ricca di informazioni, migliore sarà il risultato degli algoritmi che ne ricercano le caratteristiche (come l'edge detection).

Smart-camera. Ferve la discussione sulle *smart-camera*: essenzialmente videocamere che inglobano al loro interno la parte di processing/intelligenza e sono interfacciabili direttamente all'impianto. Il problema è essenzialmente quello della miniaturizzazione e di come generare il software di programmazione e configurazione della smart-camera. Separare il sensore dal processore continua ad offrire una maggiore flessibilità in termini di risoluzione, velocità, colore. Il limite inferiore delle smart-cameras è dovuto agli *smart vision sensor*: dei sensori dedicati, basati sull'acquisizione immagine, con capacità specifiche (ma limitate).

Infine merita un cenno, il passaggio della microelettronica dei sensori da *CCD* a *Cmos* (questa ultima è la tecnologia utilizzata nella fabbricazione di quasi tutto il mondo dei *CIP* elettronici fino ai più potenti e diffusi processori). Il passaggio è stato (ed è tutt'ora) lento per la difficoltà di ottenere la stessa qualità intrinseca dei sensori *CCD*, ma è fortemente motivato per questioni di riduzione dei costi, e velocità operativa dei sensori, dovuta alla possibilità di accedere in modo random (come per le memorie *RAM*) a sub-aree specifiche del sensore, e soprattutto alla possibilità di integrare sullo stesso substrato e quindi in un solo processo sensore e processore.

Nel riquadro seguente è riportata una tabella con i campi di utilizzo di videocamere tipo firewire utilizzabili col nostro ambiente di sviluppo (*VA*, *VB*, *LV*, *IMAQ for LV*):

Firewire Bandwidth Allocation										
Supported					Not Supported as of IMAQ 1394 v1.5					
Defined in IIDC v1.3					Proposed in IIDC v1.31 (<=400Mbps)					
					>400Mbps					
100Mbps = 1024 Bytes/packet										
200Mbps = 2048 Bytes/packet										
400Mbps = 4096 Bytes/packet										
800Mbps = 8192 Bytes/packet										
1600Mbps = 16384 Bytes/packet										
3200Mbps = 32768 Bytes/packet										
General guidelines to achieve maximum bandwidth:										
Cumulative packet size from all cameras must not exceed approximately 4096 bytes.										
For example: 2 cameras in Format 0, Mode 3, can theoretically achieve 15 frames per second.										
both cameras at 15 frames/second: 1280 * 2 = 2560 is less than 4096 and therefore possible										
both cameras at 30 frames/second: 2560 * 2 = 5120 is greater than 4096 and therefore not possible										
one at 15 frames/second and one at 30 frames/second = 1280 + 2560 = 3840 is less than 4096 and therefore possible										
Bytes per packet										
			Frames per second							
Format	Mode	Image Type	240	120	60	30	15	7,5	3,75	1,875
0	0	160x120 YUV (4:4:4)	1920	960	480	240	120	60		
	1	320x240 YUV (4:2:2)	5120	2560	1280	640	320	160	80	40
	2	640x480 YUV (4:1:1)	15360	7860	3840	1920	960	480	240	120
	3	640x480 YUV (4:2:2)	20480	10240	5120	2560	1280	640	320	160
	4	640x480 RGB	30720	15360	7860	3840	1920	960	480	240
	5	640x480 Y (Mono 8)	10240	5120	2560	1280	640	320	160	80
1	6	640x480 Y (Mono 16)	20480	10240	5120	2560	1280	640	320	160
	0	800x600 YUV (4:2:2)	32000	16000	8000	4000	2000	1000	500	
	1	800x600 RGB		24000	12000	6000	3000	1500		
	2	800x600 Y (Mono 8)	16000	8000	4000	2000	1000	500		

	3	1024x768 YUV (4:2:2)		24576	12288	6144	3072	1536	768	384
	4	1024x768 RGB			18432	9216	4608	2304	1152	576
	5	1024x768 Y (Mono 8)	24576	12288	6144	3072	1536	768	384	192
	6	800x600 Y (Mono 16)	32000	16000	8000	4000	2000	1000	500	
	7	1024x768 Y (Mono 16)		24576	12288	6144	3072	1536	768	384
2	0	1280x960 YUV (4:2:2)			20480	10240	5120	2560	1280	640
	1	1280x960 RGB			30720	15360	7680	3840	1920	960
	2	1280x960 Y (Mono 8)		20480	10240	5120	2560	1280	640	320
	3	1600x1200 YUV (4:2:2)			32000	16000	8000	4000	2000	1000
	4	1600x1200 RGB				24000	12000	6000	3000	1500
	5	1600x1200 Y (Mono 8)		32000	16000	8000	4000	2000	1000	500
	6	1280x960 Y (Mono 16)			20480	10240	5120	2560	1280	640
	7	1600x1200 Y (Mono 16)			32000	16000	8000	4000	2000	1000

Posizionamento della webcam

La webcam dovrà essere posizionata in due modi differenti, a seconda del task che si deve effettuare:

- ricerca e posizionamento piastre;
- ricerca e posizionamento del gap;

Ricerca e posizionamento piastre. Nel primo task la webcam dovrà trovarsi in una posizione tale da inquadrare tutta la griglia di lavoro, in modo tale da poter effettuare la ricerca di tutte le piastre presenti, e dare al sistema di controllo la relativa posizione (posizione presa rispetto ad un riferimento relativo posto nel quadro immagine). Per i nostri studi, è stata scelta come posizione quella visibile nella figura seguente:

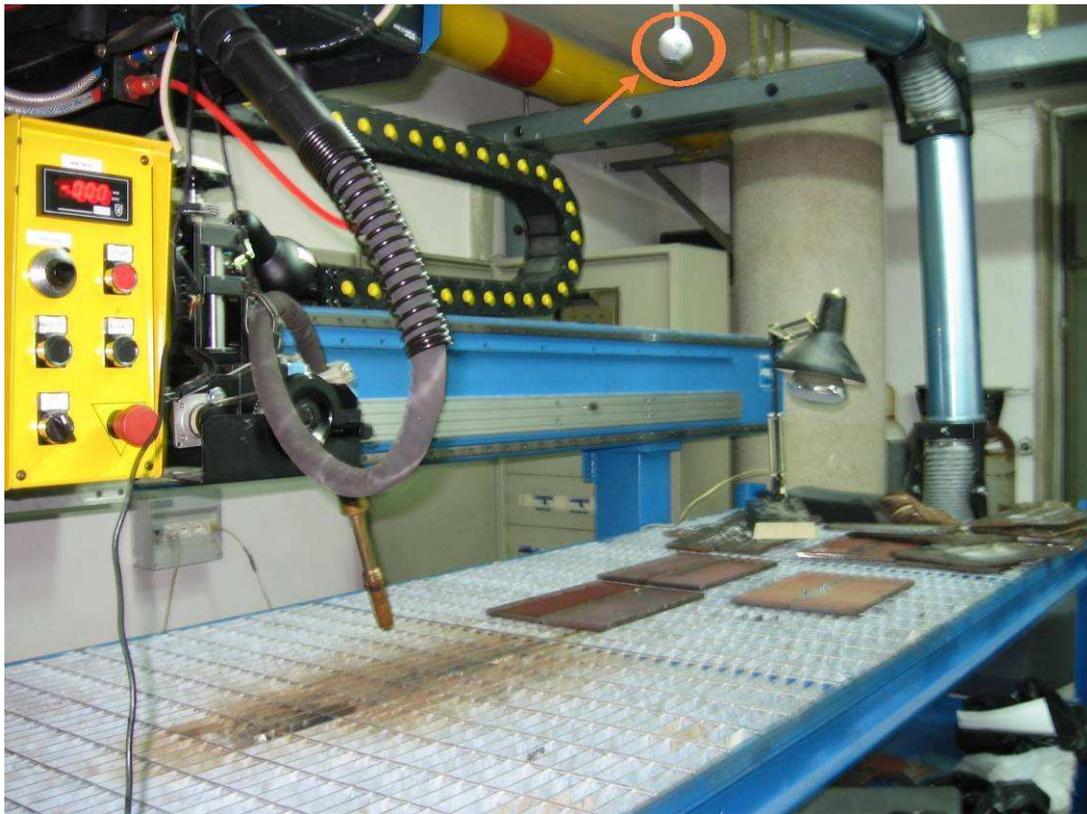
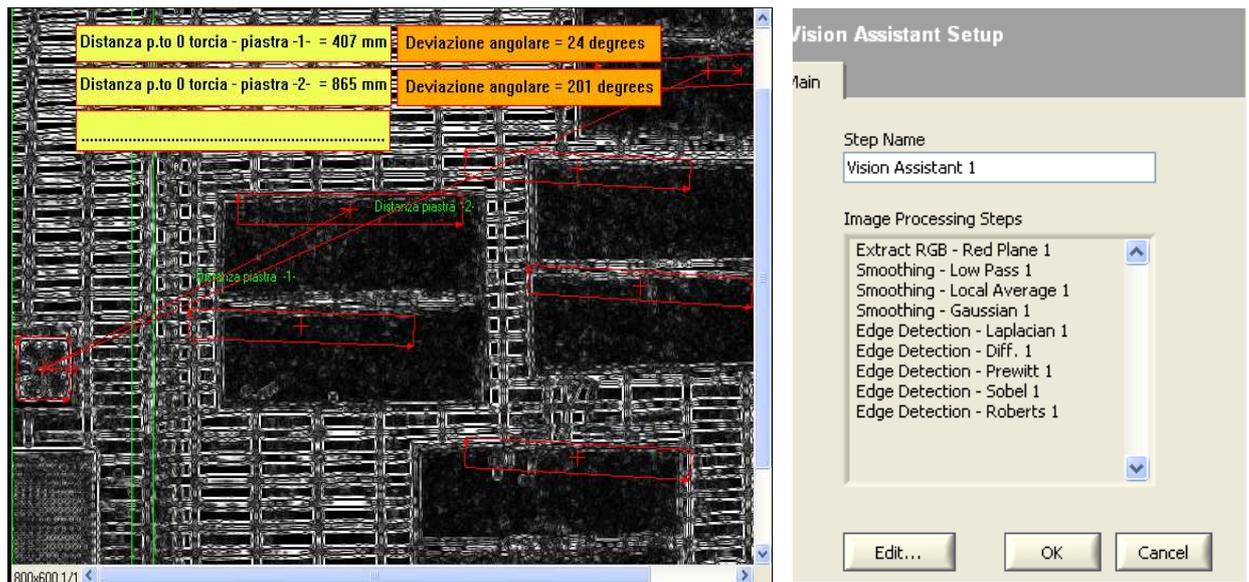


Figura: posizionamento della webcam per il task di ricerca piastre

Grazie a questo posizionamento, è stato possibile inquadrare la porzione di griglia con sopra le piastre, e creare un algoritmo per il riconoscimento, inoltre per rendere lo stesso robusto alla variazione di luminosità (entro un certo range) e alla perdita inevitabile di dettagli causata dall'ottica poco performante della webcam, si è fatto ricorso ad un elevato numero di filtri ed operatori morfologici, come si può vedere nelle immagini seguenti:



Ricerca e posizionamento del gap. In questo secondo task, è stato necessario porre la webcam in una posizione ravvicinata, fermamente bloccata alla slitta verticale, e in una posizione ferma rispetto al moto della stessa.





Figure: posizionamento webcam per il task di centraggio torcia

In realtà, è previsto l'uso di due webcam, ed il richiamo delle stesse per effettuare i diversi task sarà possibile attraverso l'uso contemporaneo dei programmi di visione insieme al LabVIEW ed al programma IMAQ Vision for LabVIEW.

7.24 IL SOFTWARE DI RICONOSCIMENTO DEL GIUNTO

Il sistema di acquisizione immagini è stato sviluppato in maniera autonoma ed è basato su una videocamera con sensore CCD a colori a risoluzione di 658 x 494 pixel.

Tale strumento è dotato, inoltre, di un interfaccia del tipo IEEE1394 per la comunicazione con il PC ad una velocità di trasferimento di 400 Mbit/s ed un Frame Rate di oltre 60fps.

La videocamera è stata montata in modo da inquadrare il campo immediatamente a monte della torcia di saldatura. Il valore della distanza dell'asse della telecamera dall'asse della torcia è oggetto di ottimizzazione. In figura 12 è riportata la videocamera montata sull'impianto insieme con il sistema di illuminazione a LED. Per la gestione del sistema di visione è stato sviluppato un programma sperimentale specifico per l'impianto, denominato "SEAM TRACKER", ST.

Il Programma è stato inizialmente concepito per effettuare una scansione del giunto con salvataggio su un file, di tipo *.xls, della geometria del meato di saldatura.



Figura 3. Videocamera

Durante l'intera fase di ispezione ed acquisizione dei parametri rilevati, nonché di movimentazione della torcia tutti i valori riportati sono riferiti ad un sistema di assi cartesiani (O,x, y, z) disposti come in figura 4.

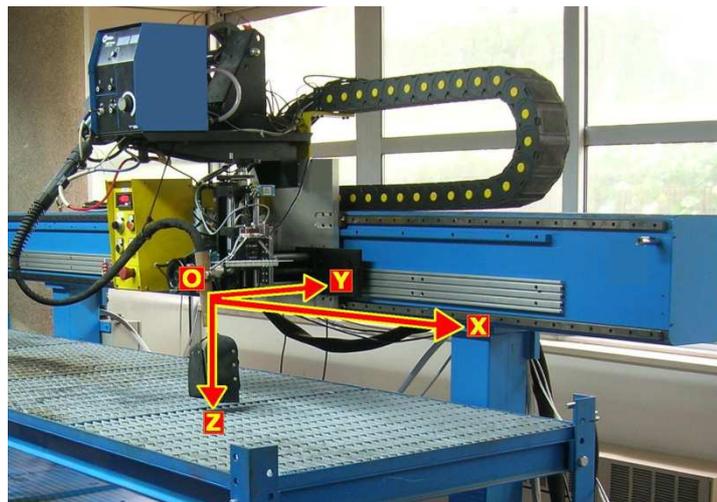


Figura 4. Sistema di riferimento scelto con origine nello zero macchina

Successivamente i dati vengono rielaborati, filtrati ed eventualmente interpolati per poi permettere l'inseguimento del giunto.

Lo studio si è quindi concentrato verso la definizione di sistemi per la acquisizione delle immagini per consentire il posizionamento automatico della torcia di saldatura istante per istante.

Durante la scansione del campo operativo, il sistema riconosce il meato di saldatura. I dati vengono analizzati e viene estratta una curva di interpolazione che definisce la traiettoria della torcia e fornisce i comandi al sistema fisico.

L'operazione di ricerca dei confini di un oggetto presente nell'inquadratura della telecamera è stata la tecnica utilizzata per la ricerca e l'identificazione delle piastre sul piano di lavoro, per la ricerca del gap e per la successiva analisi dimensionale.

Uno degli strumenti utilizzati è l'Edge Detection. Con l'Edge Detection è possibile riconoscere i bordi di un oggetto all'interno di un'immagine. L'idea base è racchiusa nel principio che in un'immagine ogni oggetto apporta dei cambiamenti locali. Questi cambiamenti delle proprietà di ogni pixel sono molto netti e coinvolgono quelli che fanno parte dei contorni. Quindi il contorno in un'immagine risulta essere un cambio locale e significativo nell'intensità dei pixel.

Esistono vari tipi di discontinuità.

Step discontinuities (discontinuità ad un passo) cioè si ha un cambiamento repentino del valore dell'intensità dei pixel. Si immagini, per esempio, una piastra nera su sfondo bianco: se si scorre l'immagine da sinistra a destra, ad un certo punto si noterà un salto nell'intensità dei pixels e questo salto permarrà fin quando la piastra non finisce. Si ha appunto un salto nell'intensità di colore dei pixels come mostrato nella Figura 14.

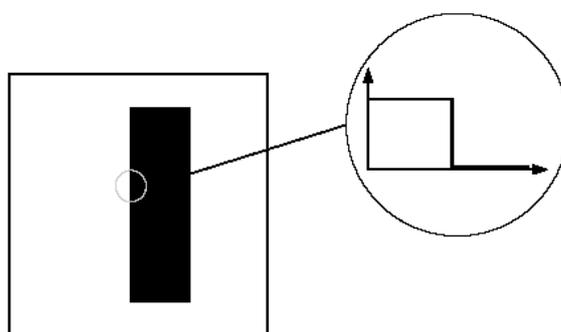


Figura 5. L'andamento dell'intensità presenta un salto

Line discontinuities dove si ha un repentino cambio di valore dell'intensità ma si ritorna al valore precedente dopo una breve distanza. Si può immaginare un filo nero (un graffio) su di uno sfondo bianco, se si scorre l'immagine da sinistra a destra si otterrà un salto nell'intensità del pixels ma subito dopo (pochi pixels dopo) si ritornerà al valore che contraddistingue lo sfondo. Si ha appunto una linea all'interno dell'immagine, come mostrato nella Figura 15.

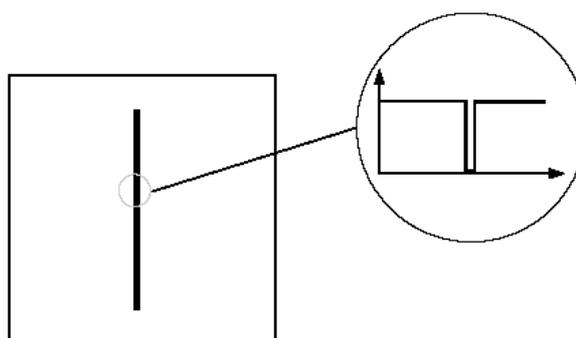


Figura 6. L'andamento dell'intensità presenta un salto, ma subito si riporta al valore iniziale

Line and roof edge dove il cambio di intensità degli oggetti che compongono l'immagine risulta essere graduale. Ciò significa che il confine di un oggetto può confondersi con lo sfondo, per esempio potrebbe essere poco illuminato, o il colore dell'oggetto è molto simile a quello che gli sta attorno, o per altri motivi ancora, man mano che si scansiona l'immagine la distinzione con lo sfondo si fa sempre più netta e ad un certo punto il divario diviene così sensibile che l'algorithmo rileva un confine, anche se in realtà il confine dell'oggetto era già stato superato, come mostrato nella Figura 16. Questo fatto può portare a cattive interpretazioni di ciò che l'immagine contiene.

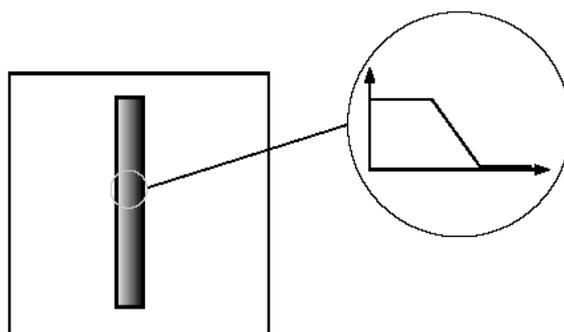


Figura 7. L'andamento dell'intensità presenta una variazione graduale

Roof edge che è un caso molto simile al precedente se non per il fatto che non si raggiunge il valore di soglia che fa rilevare il confine, ma arrivato in prossimità di esso si ha un'inversione di intensità nei pixel e man mano che si avvanza nella scansione si ritorna ai valori dello sfondo come mostrato nella Figura 17.

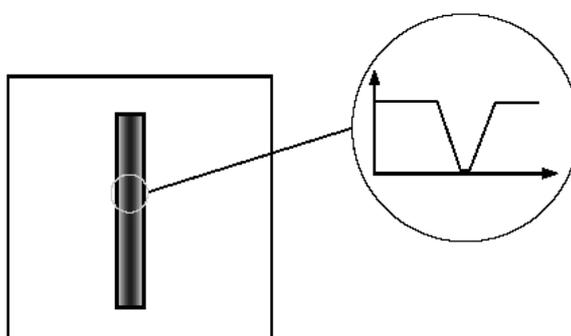


Figura 8. L'andamento dell'intensità presenta una diminuzione graduale seguita da un incremento graduale

L'Edge detection è alla base del riconoscimento del gap tra i lembi da saldare e viene sfruttato facendo una scansione da sinistra verso destra lungo una linea orizzontale perpendicolare alla direzione di saldatura.

Per validare il sistema di acquisizione immagini si è posta l'attenzione ad un particolare problema industriale relativo alla saldatura anima-piattabanda che si

effettua per la realizzazione di carrelli ferroviari del tipo illustrato in figura 9, la quale presenta difficoltà connesse alla presenza di traiettorie curve.



Figura 9. Carrello ferroviario

E' stato realizzato un simulacro con traiettoria curva ed è stata verificata la capacità del sistema di guidare la torcia lungo il percorso e di determinare con precisione la larghezza del meato di saldatura.



Figura 10. Modello utilizzato per validare il sistema

Si descrive di seguito il programma realizzato e se ne analizza il funzionamento.

Per lo sviluppo del software di acquisizione e controllo è presente la programmazione in ambiente Labview versione 8.0, l'ambiente di sviluppo realizzato dalla National Instruments appositamente per applicazioni di questo tipo.

Labview è un ambiente di sviluppo ad oggetti di tipo grafico e non richiede una preparazione così specifica come quella necessaria per programmare in linguaggi text-based.

I progetti realizzati in Labview, sono caratterizzati dall'estensione “.VI”, acronimo di “virtual instrument” e si compongono di due parti distinte:

- FRONT PANEL;
- BLOCK DIAGRAM.

L'idea che sta alla base di questa impostazione è quella di realizzare uno strumento virtuale simile il più possibile a quello reale.

Un qualsiasi strumento reale, cioè materialmente esistente e non simulato via software, si compone essenzialmente di un pannello frontale e di una circuiteria interna. Il pannello frontale permette all'utente di impostare e leggere i vari parametri. I circuiti interni, non visibili all'utente, svolgono le funzioni necessarie al funzionamento dello strumento.

Nello strumento virtuale, il FRONT PANEL e il BLOCK DIAGRAM, sostituiscono rispettivamente il pannello frontale e la circuiteria dell'analogo strumento reale. Programmare in Labview significa quindi sviluppare un algoritmo nel block diagram e disporre contemporaneamente, sul front panel, tutti gli elementi di controllo e lettura.

Al programma realizzato in tale ambiente di sviluppo è stato assegnato il nome “**SEAM TRACKER 2007 versione 1.0.**”

IL SEAM TRACKER

Nella Figura 11 è mostrato, come appare all’utente, il front panel del programma SEAM TRACKER 2007 versione 1.0.

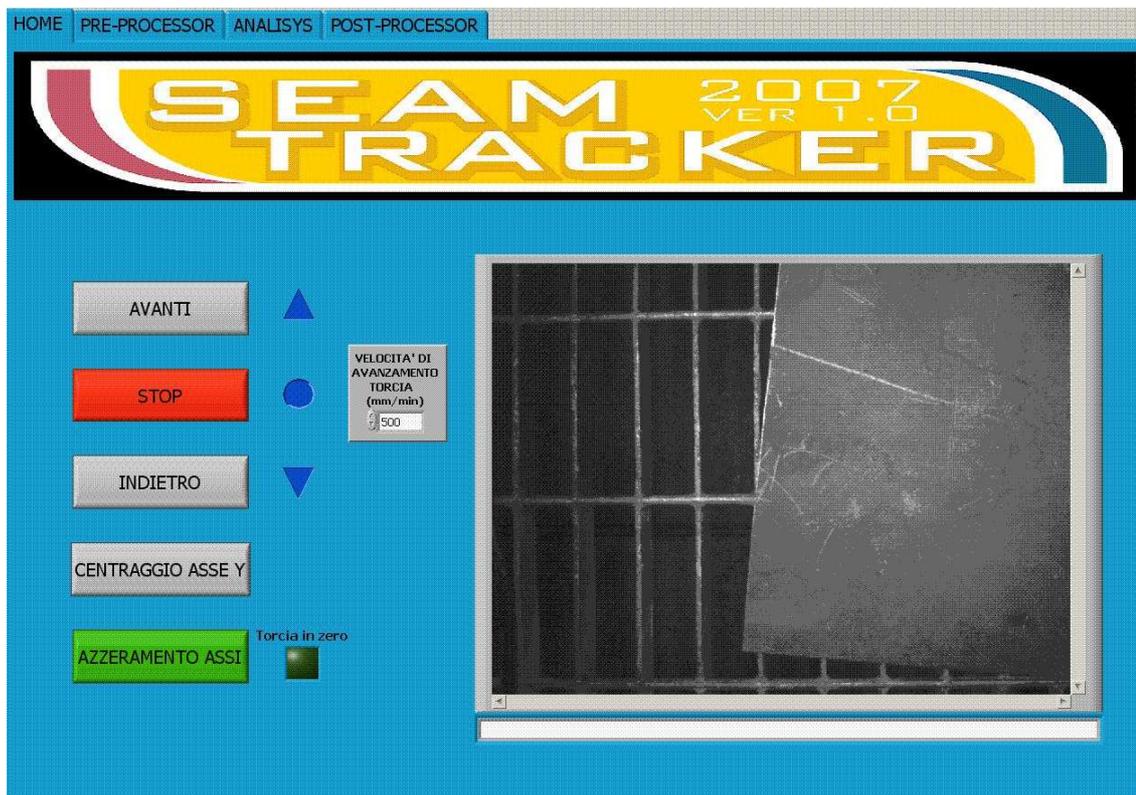


Figura 11 – Il front panel del programma SEAM TRACKER 2007 versione 1.0.

Nella Figura 12 è mostrata, invece, una porzione del relativo block diagram.

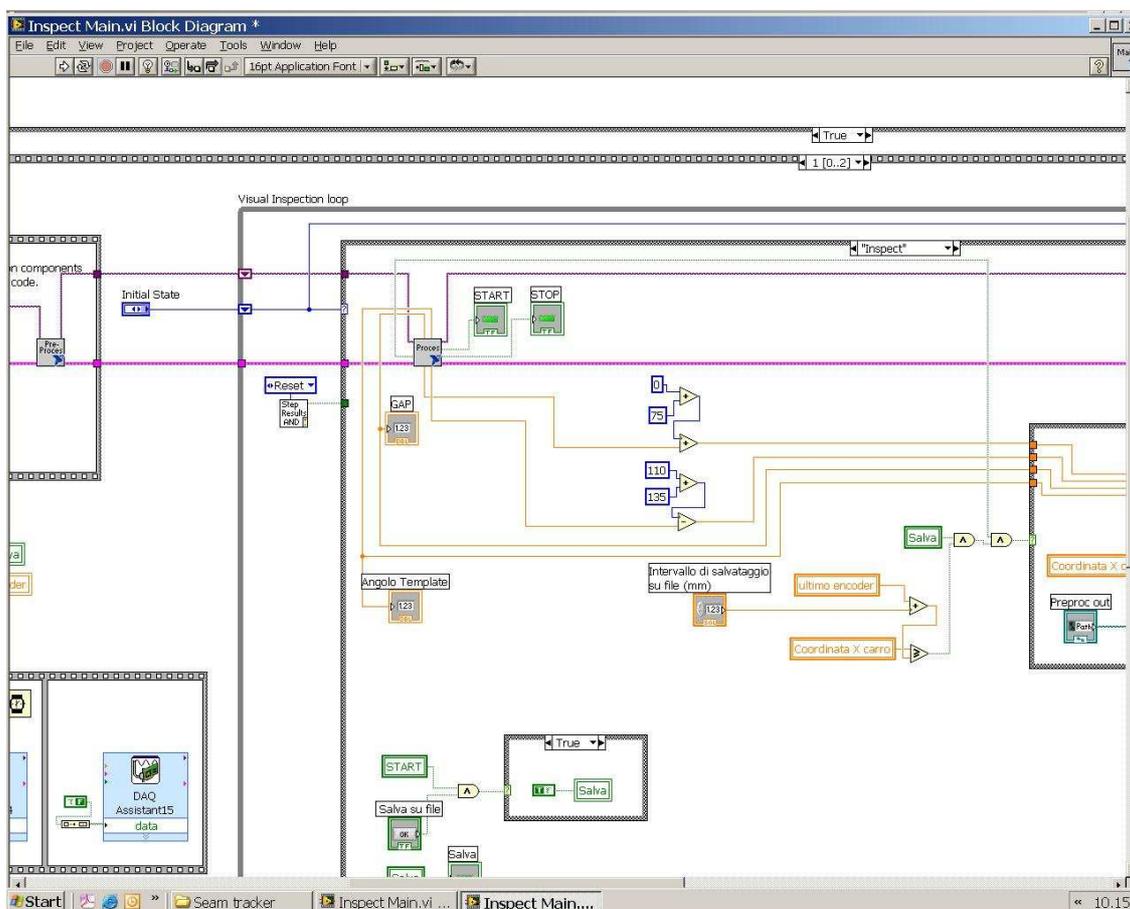


Figura 12 – Il Block diagram del programma SEAM TRACKER 2007 versione 1.0.

Il front panel è stato suddiviso in 4 cartelle, denominate: HOME, PRE-PROCESSOR, ANALYSIS, POST-PROCESSOR. In seguito si analizzeranno in dettaglio le funzioni di ciascuno di essi.

Durante l'intera fase di ispezione ed acquisizione dei parametri rilevati, nonché di movimentazione della torcia tutti i valori riportati sono riferiti ad un sistema di assi cartesiani (O,X,Y,Z) disposti nel modo seguente:

- **Asse X:** è l'asse longitudinale del carro torcia;

- **Asse Y:** è l'asse trasversale di saldatura (il movimento della torcia lungo di esso è indispensabile se si vuole garantire un costante allineamento tra l'asse della torcia e quello del gap tra i due lembi da saldare);
- **Asse Z:** è l'asse verticale perpendicolare ad i primi due orientato dall'alto verso il basso (il movimento della torcia lungo di esso è indispensabile per controllare la distanza tra la torcia ed il bagno fuso e quindi concorre anche alla lunghezza di stick-out);

La disposizione di questo sistema di riferimento è chiarita dalla Figura 13

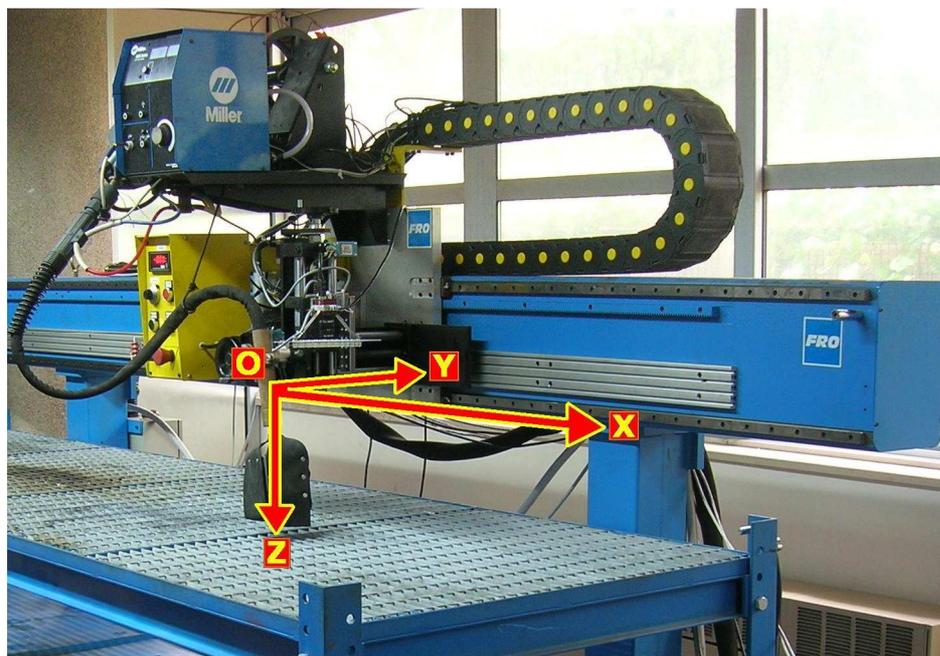


Figura 13 – Sistema di riferimento scelto con origine nello zero macchina

LA CARTELLA HOME

La cartella *HOME* del SEAM TRACKER si presenta come in Figura 14, e risulta essere la schermata di presentazione del programma.



Figura 14 – La cartella HOME del SEAM TRACKER 2007

In questa sezione del software sono presenti:

- **L'IMMAGINE TELECAMERA**, grazie alla quale è possibile visualizzare in tempo reale l'immagine acquisita dalla telecamera. Tale operazione è utile in fase preliminare, sia per un eventuale allineamento

dell'asse di acquisizione con quello del gap tra gli elementi da saldare (operazione questa che assicura la costante presenza del giunto all'interno dell'inquadratura), sia per effettuare operazioni di regolazione di messa a fuoco ed esposizione della videocamera, nonché di regolazione del sistema di illuminazione per garantire la corretta illuminazione dell'intera zona di lavoro;

- I pulsanti di **MOVIMENTAZIONE DELLA TORCIA** identificati con le etichette **AVANTI**, **STOP**, ed **INDIETRO** che servono a controllare il movimento della torcia lungo l'asse longitudinale. La loro funzione è sostanzialmente la stessa di quella svolta dai pulsanti presenti sul pannello frontale del carro motorizzato;
- Il pulsante **AZZERAMENTO**, per la ricerca dello *zero macchina* (posto nell'origine del sistema di riferimento O,X,Y,Z). Tale operazione è obbligatoria in quanto sull'impianto, per rilevare la posizione sui singoli assi, sono stati installati encoder relativi, quindi è necessario effettuare l'azzeramento per poter conoscere la posizione raggiunta in seguito ad uno spostamento.
- Il pulsante **CENTRAGGIO ASSE X**, grazie al quale è possibile spostare la torcia al centro dell'asse X posizione di riferimento scelta per l'inizio della fase di scansione del giunto.
- La casella per l'impostazione della **VELOCITA' DI AVANZAMENTO TORCIA**, grazie alla quale è possibile impostare la

velocità di avanzamento longitudinale della torcia (espressa in mm/min).
Il suo valore di default è 500mm/min;

All'avvio del programma, una volta posizionate le piastre da saldare sul piano di lavoro, sarà possibile visualizzare in tempo reale l'IMMAGINE TELECAMERA, effettuare l'AZZERAMENTO, e successivamente il CENTRAGGIO ASSE X, e procedere poi grazie ai pulsanti di MOVIMENTAZIONE DELLA TORCIA a verificare l'allineamento dell'asse di acquisizione con quello del gap tra gli elementi da saldare. Se le piastre da saldare, e quindi il relativo gap non dovessero rientrare interamente nell'inquadratura, si procederà manualmente ad una migliore disposizione delle stesse.

LA CARTELLA PRE-PROCESSOR

La cartella *PRE-PROCESSOR* del SEAM TRACKER 2007 versione 1.0 si presenta come in Figura 15.

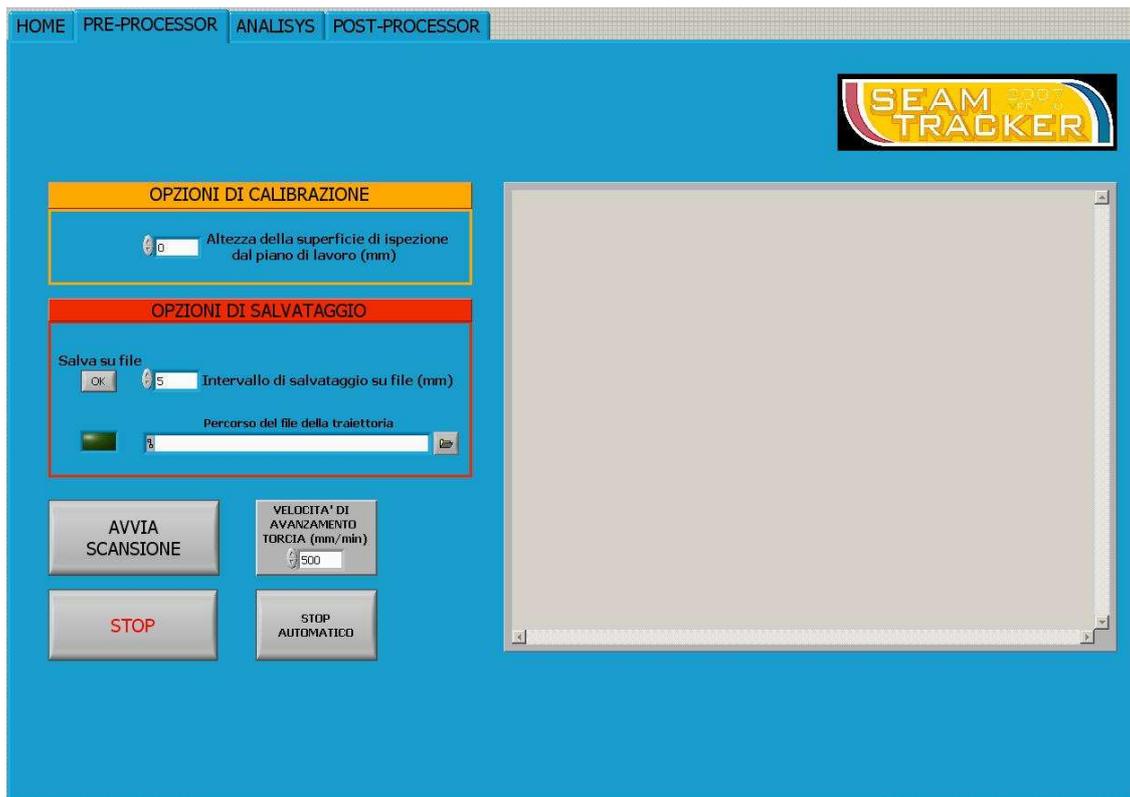


Figura 15 – La cartella PRE-PROCESSOR del SEAM TRACKER 2007 versione 1.0

Questa è la sezione del programma dedicata alla scansione del giunto di saldatura grazie alla quale è possibile rilevare tutti i parametri geometrici degli elementi da saldare.

In questa sezione del programma sono presenti:

- **L'IMMAGINE TELECAMERA**, grazie alla quale è possibile visualizzare in tempo reale l'immagine acquisita dalla telecamera, operazione utile durante la fase di scansione del giunto in quanto consente

di visualizzare, e quindi verificare, se i “templates” sono riconosciuti dal software, sintomo del corretto funzionamento del software stesso;

- La sezione **OPZIONE DI CALIBRAZIONE** nella quale è presente una casella dove inserire l'*altezza della superficie di ispezione dal piano di lavoro* (espressa in millimetri). Tale valore serve a portare la torcia a 15 mm dalla superficie degli elementi da saldare condizione questa che consente la scansione degli elementi sempre alla stessa distanza dalla telecamera in modo da non adattare di volta in volta la messa a fuoco, la calibrazione nonché la luminosità della videocamera.

- La sezione **OPZIONI DI SALVATAGGIO** sostanzialmente costituita da:

2. Il pulsante **INTERVALLO DI SALVATAGGIO SU FILE**, grazie al quale è possibile scegliere l'intervallo di campionamento (espresso in mm) con il quale si desidera salvare i dati rilevati. Il suo valore di default è 5mm. Tale valore, in sostanza, consente di salvare i dati rilevati ogni 5 mm (se non si cambia il valore di default) percorsi dalla torcia nella direzione dell'asse X;

3. Il pulsante **SALVA**, che consente di salvare in automatico i parametri rilevati durante tutta la fase di scansione in appositi report file di tipo excel. In particolare il salvataggio ha inizio quando il programma rileva il bordo inferiore (grazie al riconoscimento del template *bordo inferiore*), e termina quando il programma rileva il bordo superiore (grazie al riconoscimento del template *bordo superiore*) degli elementi da saldare;

4. Il **PATH**, da utilizzare per scegliere in quale directory del PC salvare i parametri rilevati, archiviabili in appositi report file di tipo

excel. I nomi dei file ed i relativi “path” sono specificati nella stringa immediatamente al fianco del pulsante

5. La spia **SALVATAGGIO IN CORSO**, che consente di verificare se è in corso il salvataggio dei dati rilevati.

- Il pulsante identificato con l’etichetta **STOP AUTOMATICO**, che consente la fermata ed il ritorno della torcia nella posizione zero sugli assi X ed Y (l’asse Z non viene azzerato in quanto si trova già nella corretta posizione necessaria durante la fase di saldatura, e quindi non necessita di modifiche e, quindi, di azzeramento) non appena il programma rileva il bordo superiore degli elementi da saldare.
- Il pulsante **SCANSIONE**, grazie al quale inizia la scansione del giunto.
- La casella per l’impostazione della **VELOCITA’ DI AVANZAMENTO TORCIA**, grazie alla quale è possibile impostare la velocità di avanzamento longitudinale della torcia (espressa in mm/min) e con la quale avverrà la scansione del giunto. Il suo valore di default è 500mm/min;

All’avvio di questa sessione del programma, una volta impostate le **OPZIONI DI SALVATAGGIO**, di **STOP AUTOMATICO**, e la **VELOCITA’ DI AVANZAMENTO DELLA TORCIA**, è possibile lanciare la **SCANSIONE**, ed il programma provvederà alla scansione completa degli elementi da saldare mostrandoli nell’area **IMMAGINE TELECAMERA**. I templates rilevati saranno visualizzati nell’area **IMMAGINE TELECAMERA** contornati da un rettangolo rosso.

Al termine della scansione il programma salverà tali parametri in un apposito report file di tipo excel, e la torcia si riporterà automaticamente nella posizione zero sugli assi X ed Y.

LA CARTELLA ANALYSIS

La cartella *ANALYSIS* del SEAM TRACKER si presenta come in Figura 16.

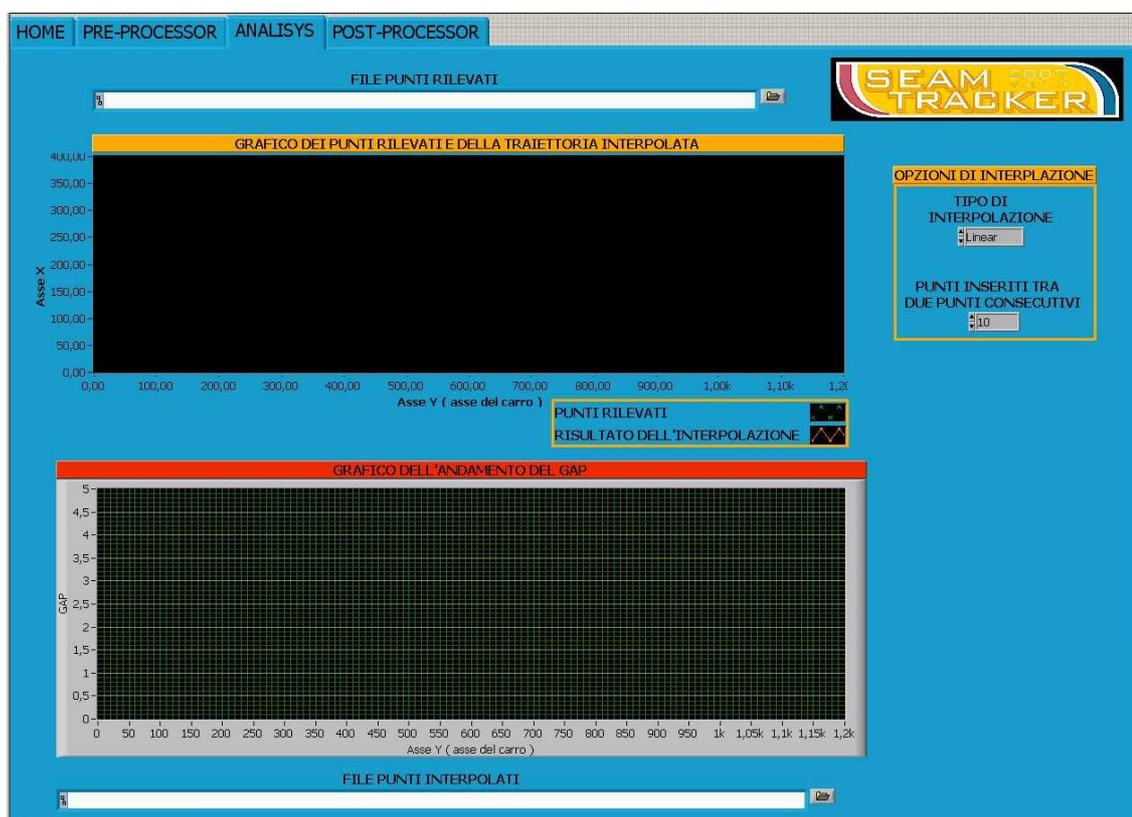


Figura 16 – La cartella ANALYSIS del SEAM TRACKER 2007 versione 1.0

In questa sezione del programma ci si propone di manipolare i dati rilevati durante la precedente fase di scansione che potrebbero essere affetti da errore.

L'errore più comune che può verificarsi è la non corretta identificazione del template per il riconoscimento del giunto da parte della sezione del software destinata all'ispezione, ma che è causa di errori di posizionamento della torcia durante la fase di saldatura.

In questa cartella del programma sono presenti 5 zone distinte, ed in particolare esse sono:

- La sezione **FILE PUNTI RILEVATI**, grazie al quale è possibile selezionare il percorso del report file generato dalla scansione eseguita precedentemente;
- Il **DIAGRAMMA TRAIETTORIA PUNTI RILEVATI E TRAIETTORIA INTERPOLATA**, nel quale sono riportate nel piano cartesiano (O,X,Y) i seguenti dati:
 - a) le *coordinate di ciascun punto rilevato* durante la scansione effettuata nella fase di Pre-processor;
 - b) la *curva interpolante* i punti rilevati durante la scansione effettuata nella fase di Pre-processor;
- Il **GRAFICO DELL'ANDAMENTO GAP**, nel quale è riportate in un piano cartesiano l'andamento del gap rilevato in funzione dell'asse longitudinale di saldatura Y;
- Le **OPZIONI DI INTERPOLAZIONE**, grazie alla quale è possibile scegliere:
 - Il TIPO DI INTERPOLAZIONE più opportuno in relazione alla traiettoria del giunto da saldare tra le seguenti: lineare, polinomiale, spline, razionale (per ulteriori chiarimenti in proposito riferirsi ad APPENDICE A);

- Il **NUMERO DI PUNTI INTERPOLANTI**, vale a dire il numero di punti che la funzione interpolante inserirà tra i punti rilevati durante la fase di pre-processor.
- La sezione **FILE PUNTI INTERPOLATI**, grazie alla quale è possibile salvare in un apposito report file le coordinate dei punti generati in seguito al tipo di interpolazione scelta, e che saranno poi seguiti dalla torcia durante la successiva fase di saldatura che avverrà nella cartella **POST-PROCESSOR** del software.

All'avvio di questa sessione del programma verrà visualizzata la traiettoria scansionata nella sezione identificata con l'etichetta **DIAGRAMMA TRAIETTORIA** ed il relativo andamento del gap nella sezione identificata con l'etichetta **DIAGRAMMA GAP**. Selezionando il **TIPO DI INTERPOLAZIONE** ed il **NUMERO DI PUNTI INTERPOLANTI**, nella sezione **DIAGRAMMA TRAIETTORIA** viene visualizzato il risultato delle scelte effettuate.

Quando la scelta risulta essere più consona con l'effettiva configurazione geometrica degli elementi da saldare è possibile salvare in un apposito report file di tipo excel le coordinate di tali punti nella sezione identificata con l'etichetta **PATH**.

LA CARTELLA POST-PROCESSOR

La cartella *POST-PROCESSOR* del SEAM TRACKER 2007 si presenta come in Figura 17.

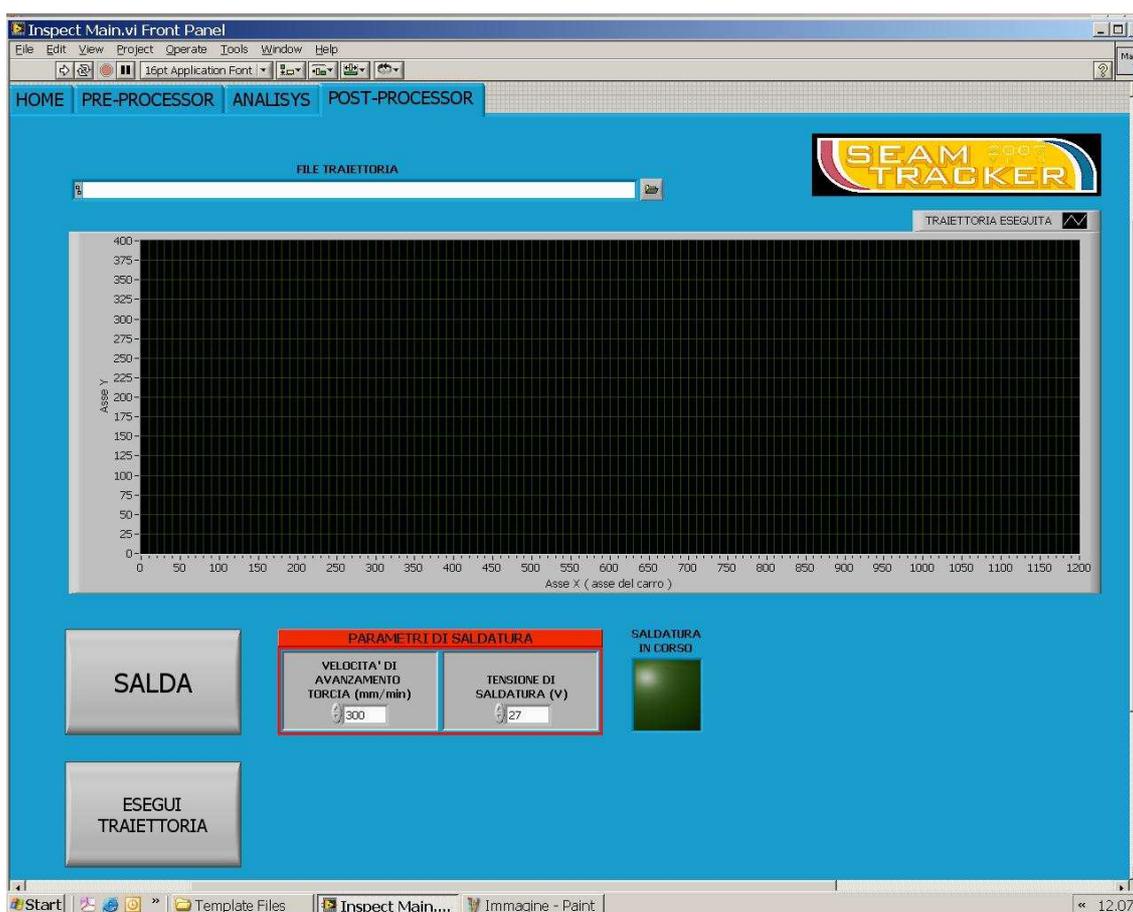


Figura 17 – La cartella POST-PROCESSOR del SEAM TRACKER 2007

In questa cartella del programma sono presenti le seguenti aree identificate con le opportune etichette, cioè:

- La sezione **FILE TRAIETTORIA** nella quale è possibile scegliere il file con le coordinate della traiettoria da eseguire durante la fase di

saldatura. In questa fase è possibile eseguire, quindi, sia una traiettoria scansionata in precedenza nella sessione PRE-PROCESSOR del software, sia una traiettoria immessa tramite un file generato ad hoc;

- La sezione **TRAIETTORIA ESEGUITA** nella quale è possibile visualizzare nel piano O,X,Y la traiettoria che verrà eseguita durante la fase di saldatura;
- Il pulsante **ESEGUI TRAIETTORIA**, grazie al quale verrà eseguita la traiettoria visualizzata nella sezione TRAIETTORIA ESEGUITA;
- Il pulsante **SALDA** grazie al quale verrà eseguita la saldatura degli elementi seguendo la traiettoria visualizzata nella sezione TRAIETTORIA ESEGUITA.
- Per una corretta saldatura sarà necessario impostare correttamente i **PARAMETRI DI SALDATURA** riportati nell'apposita area identificata con la relativa etichetta. I parametri da impostare sono:
 - La **VELOCITA' DI AVANZAMENTO TORCIA**, grazie alla quale è possibile impostare la velocità di avanzamento longitudinale della torcia, espressa in mm/min, e con la quale avverrà effettuata la saldatura;
 - La **TENSIONE DI SALDATURA**, grazie alla quale è possibile impostare la corretta tensione di saldatura, espressa in Volt, per ottenere giunzioni con buone caratteristiche meccaniche.
- E' presente inoltre una spia luminosa identificata con l'etichetta **SALDATURA IN CORSO** che consente di visualizzare a schermo quando la saldatura è in corso. Questa spia, infatti, è di colore rosso durante la fase di saldatura per avvisare dell'operazione in fase di svolgimento e resta accesa per tutto il tempo di saldatura.

A questo punto è importante mettere in evidenza che nel file eseguito è presente anche la dimensione del gap presente tra gli elementi da saldare, parametro importantissimo che consente di adattare in automatico i principali parametri di saldatura, ed in particolar modo la tensione. Ad oggi, non è stato ancora realizzato l'adattamento in automatico della tensione di saldatura, tale parametro è imposto manualmente tramite l'apposita casella di testo presente nel software realizzato, così come avviene per la velocità di avanzamento.

All'avvio di questa sessione del programma, scelto il FILE TRAIETTORIA che si intende eseguire, essa verrà visualizzata nella sezione TRAIETTORIA ESEGUITA. A questo punto, una volta impostati i PARAMETRI DI SALDATURA, vale a dire la VELOCITA' DI AVANZAMENTO TORCIA e la TENSIONE DI SALDATURA, ed abilitato il pulsante SALDA, è possibile azionare il pulsante ESEGUI TRAIETTORIA. La torcia, a partire dallo zero macchina, eseguirà l'intera traiettoria visualizzata, cominciando l'operazione di saldatura solo quando si troverà sul primo punto della traiettoria, e terminerà il processo quando avrà assunto la posizione dell'ultimo punto della traiettoria eseguita, ponendo fine, quindi, anche al processo di saldatura.

7.25 Le Tecniche di Luce Strutturata per il rilevamento tridimensionale (3D)

Con il termine luce strutturata si intende l'utilizzo di particolari sistemi ottici in grado di proiettare sull'oggetto da misurare punti certi di riferimento come linee o griglie. Siccome l'immagine di questi punti ottenuta con una camera fotografica o con un sistema di ripresa televisivo contiene l'informazione relativa alla loro altezza z rispetto ad un piano di riferimento, il valore di z si ricaverà tramite un procedimento di triangolazione.

Proiezione di una linea Il modo più semplice per analizzare un oggetto consiste nel proiettare una linea luminosa con la quale verrà evidenziata una sola sezione della sua superficie. Successivamente, spostando la linea o l'oggetto si potrà completare l'insieme delle misure.

La sorgente luminosa è tipicamente un laser munito di una lente cilindrica a corta focale in grado di produrre una linea luminosa sufficientemente intensa. L'immagine della linea viene quindi ripresa con una telecamera che è posizionata ad un angolo α diverso da quello di proiezione (fig.1). A causa dell'effetto prospettico derivante dalle condizioni di ripresa la linea si trasforma in una curva la cui forma dipende congiuntamente da α e dal profilo della superficie.

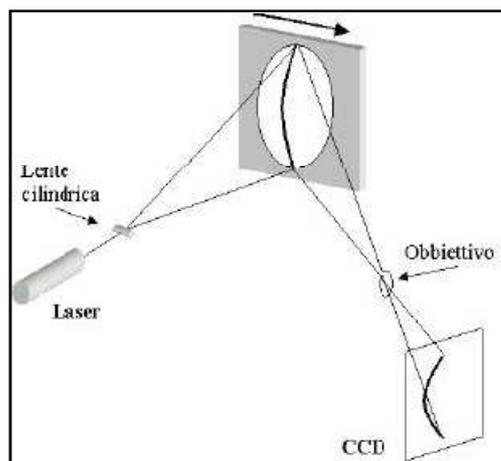


Figura 3 – realizzazione luce strutturata

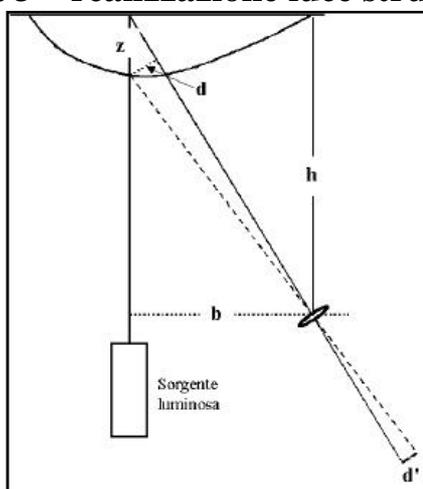


Figura 4 – principio di misurazione di una quota generica z

La fig.2 mostra invece il principio della misura di una quota generica z dell'oggetto. Questa tecnica prevede la registrazione di due immagini: la prima, del solo piano di riferimento ϵ senza l'oggetto, la seconda con l'oggetto da misurare appoggiato sul piano ϵ . Di conseguenza la superficie risulta illuminata la prima volta in f e la seconda volta in g . Nelle due immagini corrispondenti la posizione dei punti f e g appare però traslata di una quantità d' che è legata all'altezza locale z dalla seguenti relazioni:

$$d = \frac{d'}{M} \quad (1)$$

$$\theta = \operatorname{tang} \frac{b}{h} \quad (2)$$

$$z = \frac{d}{\operatorname{sen}\theta} \quad (3)$$

Dove M rappresenta la magnificazione del sistema ottico.

Proiezione di un reticolo

Il metodo della proiezione di un reticolo viene usato quando non sia conveniente spostare l'oggetto o la linea luminosa. Si usano proiettori per diapositive o videoproiettori pilotati da computer per esaminare tutta la superficie dell'oggetto da misurare. Il profilo caratteristico dell'oggetto si ricava a posteriori elaborando l'intera immagine.

Aumentando la densità di righe per unità di superficie dell'oggetto si migliora la risoluzione spaziale ma contemporaneamente possono nascere delle ambiguità nell'identificazione della continuità di una linea. Infatti se la pendenza della superficie varia piuttosto rapidamente, può accadere che non si riesca a confrontare le linee del piano di riferimento con quelle dell'oggetto.

Questo inconveniente può far nascere dei problemi nella fase di sviluppo di programmi di calcolo automatici che estraggono il profilo di altezza dell'oggetto senza nessun intervento dell'operatore.

Una tecnica alternativa che riduce questo problema è quello della proiezione di un certo numero di righe colorate che si susseguono con una sequenza precisa. Siccome le linee con gli stessi colori si presentano ben separate fra loro, l'ambiguità nella ricostruzione delle coppie di linee si riduce drasticamente.

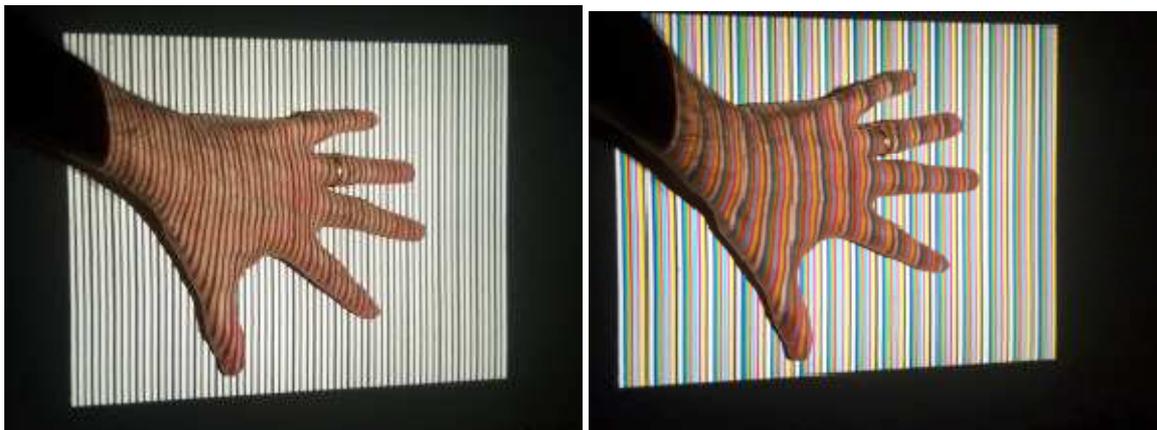


Figura 3 – esempio di ricostruzione di una geometria mediante l’utilizzo di righe diversamente colorate



Figura 4 – esempio di ricostruzione di una geometria mediante l’utilizzo di righe e laser

Il sistema di Visione

Viste le caratteristiche di efficacia e praticità di tale metodo si è deciso di utilizzare tale sistema per la determinazione delle proprietà geometriche del cianfrino nel sistema di visione artificiale oggetto di questo studio.

Lo schema rappresentante le connessioni logiche del sistema di visione viene rappresentato in fig.5, mentre una ricostruzione al CAD viene rappresentata in fig.7.

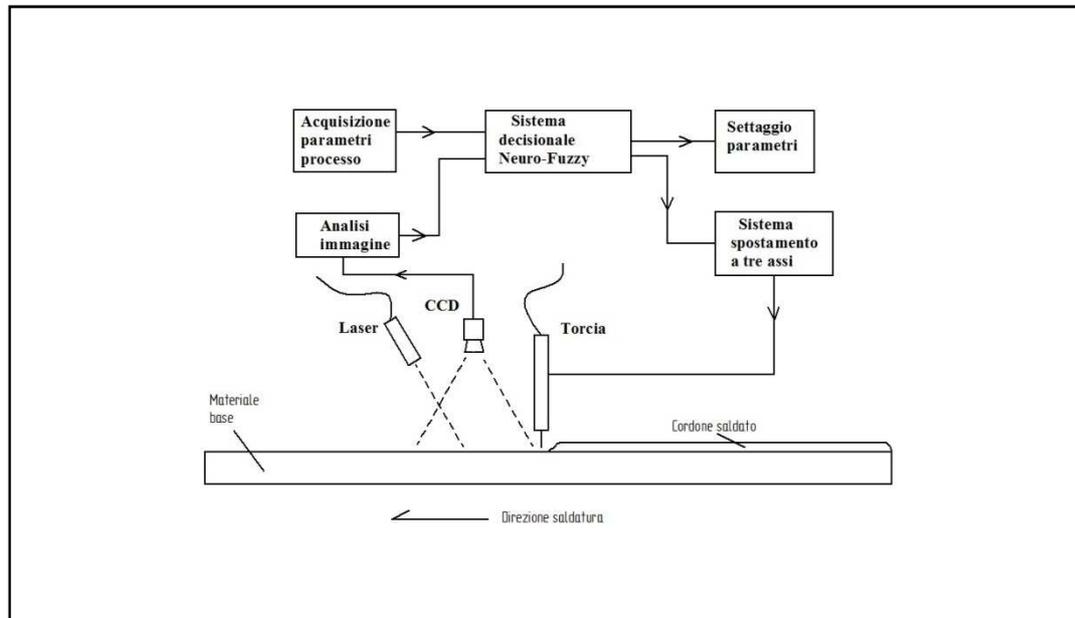


Figura 5 - schema logico sistema di visione

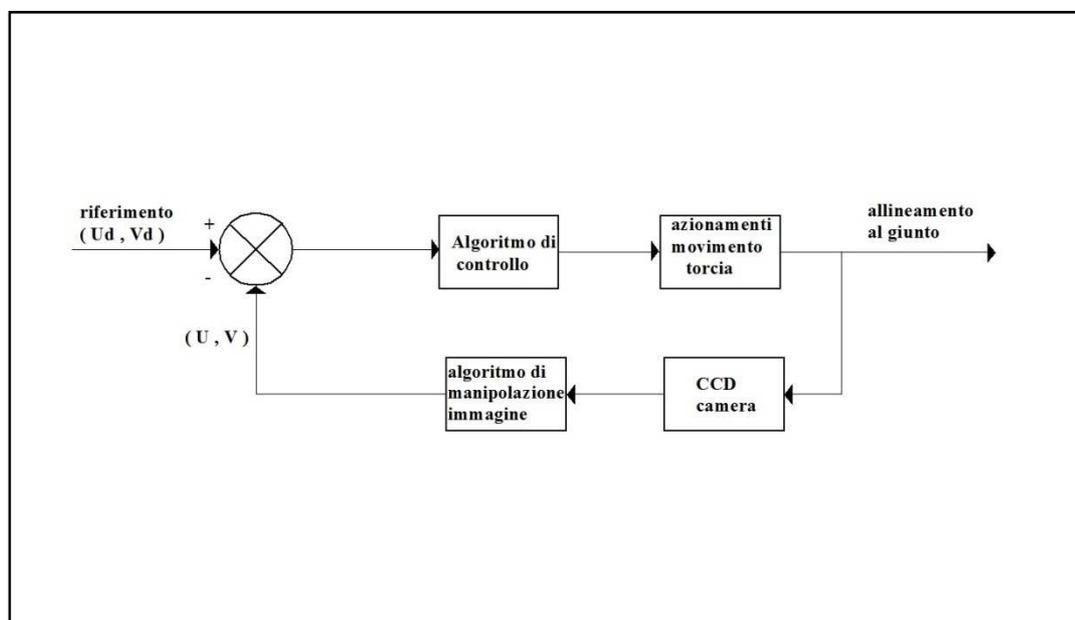


Figura 6 – schema ad anello chiuso del sistema di controllo torcia

L'immagine della traccia laser sul cianfrino viene acquisita mediante una CCD ed analizzata via software. I dati ricavati vengono elaborati insieme a parametri specifici di processo mediante logica Neuro-Fuzzy dalla quale poi partiranno i segnali di uscita per la movimentazione della torcia ed i parametri di processo più adeguati.

Il sistema di controllo della torcia, evidentemente ad anello chiuso (fig.6), utilizza le informazioni lette dalla telecamera come feedback per l'allineamento istantaneo della torcia al giunto.

L'intero anello è controllato in maniera proporzionale, integrativa e derivativa (P.I.D.)

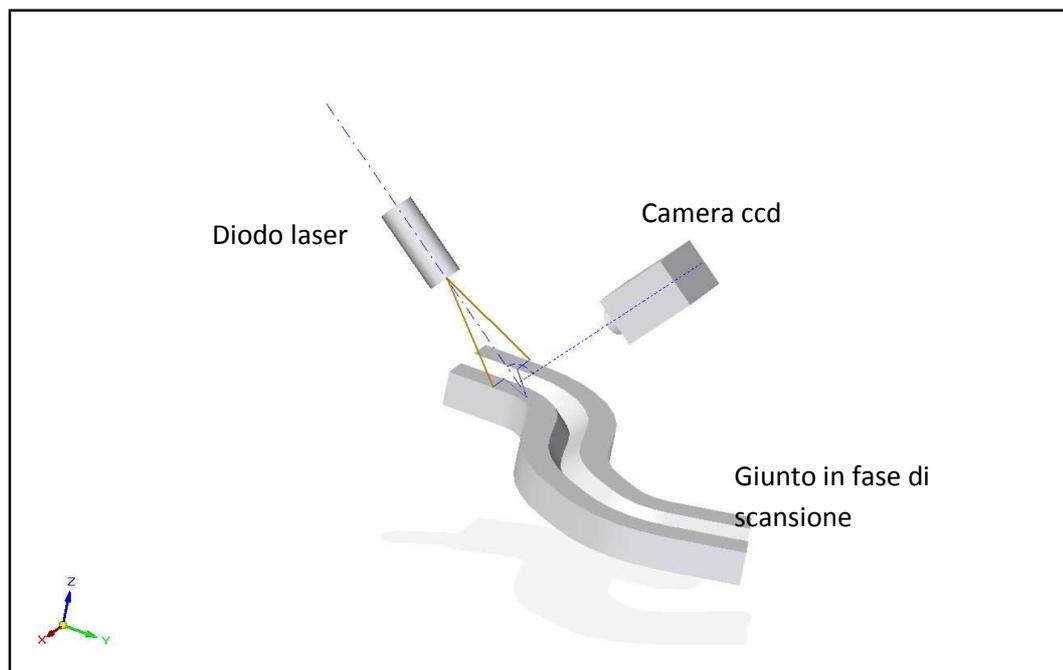


Figura 7 - schema concettuale del sistema sviluppato

Il sistema sviluppato per la visione artificiale consta fondamentalmente di tre componenti, camera CCD, diodo laser e filtro passabanda (fig.8).

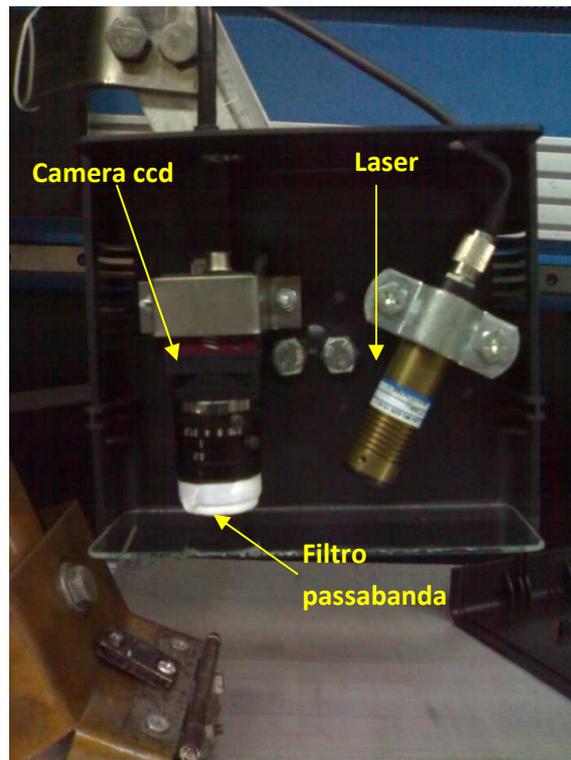


Figura 8 – box sistema di visione artificiale

L'immagine costituita da una luce strutturata viene filtrata da un filtro passabanda che taglia tutte le lunghezze d'onda dell'arco diverse da quella del laser per poi giungere alla CCD della camera.

La banda passante del filtro è stata scelta in funzione dello spettro di emissione dell'arco M.I.G

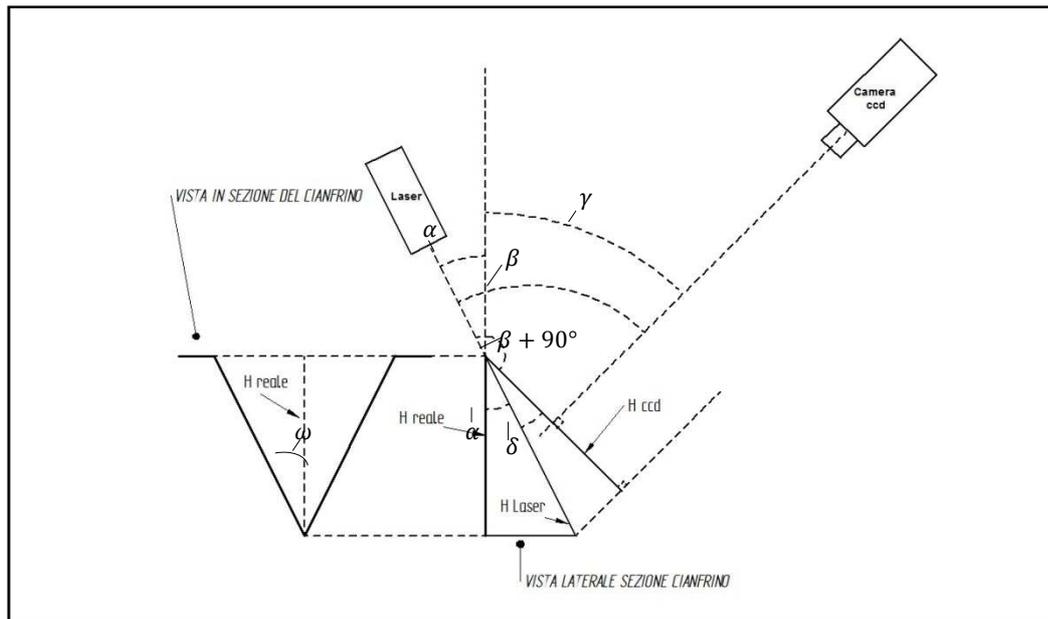


Figura 9 – parametri geometrici del sistema di visione

Attraverso rapidi passaggi matematici è possibile risalire alle caratteristiche geometriche reali del cianfrino partendo dall'immagine visibile nella CCD. In realtà quest'ultima immagine, la cui altezza è indicata con H_{ccd} come mostrato in fig.9, rappresenta la proiezione sul piano della telecamera dell'impronta lasciata dal laser, la cui traccia nel piano del foglio è indicata con H_{laser} .

A sua volta, l'impronta laser (H_{laser}) rappresenta un'informazione attraverso la quale è possibile, per via trigonometrica, risalire alle dimensioni reali del cianfrino.

Successivamente verranno riportati i passaggi necessari per la determinazione del parametro H_{reale} rappresentante la profondità del cianfrino reale partendo dalla profondità letta dal software dalla CCD della camera.

$$H_{reale} = \cos(\alpha) * H_{laser} \quad (4)$$

$$H_{ccd} = \cos(\delta) * H_{laser} \quad (5)$$

$$\delta = 90^\circ - \beta \quad (6)$$

$$H_{ccd} = \frac{\cos(\delta)}{\cos(\alpha)} * H_{reale} \quad (7)$$

da cui

$$H_{reale} = \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\delta)} * H_{ccd} \quad (8)$$

sostituendo δ si ottiene

$$H_{reale} = \frac{\cos(\alpha)}{\cos(90^\circ - \beta)} * H_{ccd} \quad (9)$$

inoltre ricordando che

$$\cos(90^\circ - \beta) = \sin(\beta) \quad (10)$$

possiamo scrivere

$$H_{reale} = \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta)} * H_{ccd} \quad (11)$$

$$H_{reale} = C * H_{ccd} \quad (12)$$

dove con C si è indicato il coefficiente correttivo in funzione degli angoli α e β rappresentanti due parametri geometrici costruttivi del sistema di visione che rappresentano, rispettivamente, l'angolo di inclinazione del laser rispetto al piano verticale e l'angolo compreso tra laser e camera.

$$C = \frac{\cos(\alpha)}{\sin(\beta)}$$

(13)

Tale processo verrà reiterato per tutti i lati del triangolo rappresentante il cianfrino tenendo però conto dell'effetto dovuto all'angolo di semi apertura ω del cianfrino stesso come di seguito illustrato per il computo dell'angolo α' , infatti si consideri la fig. 10

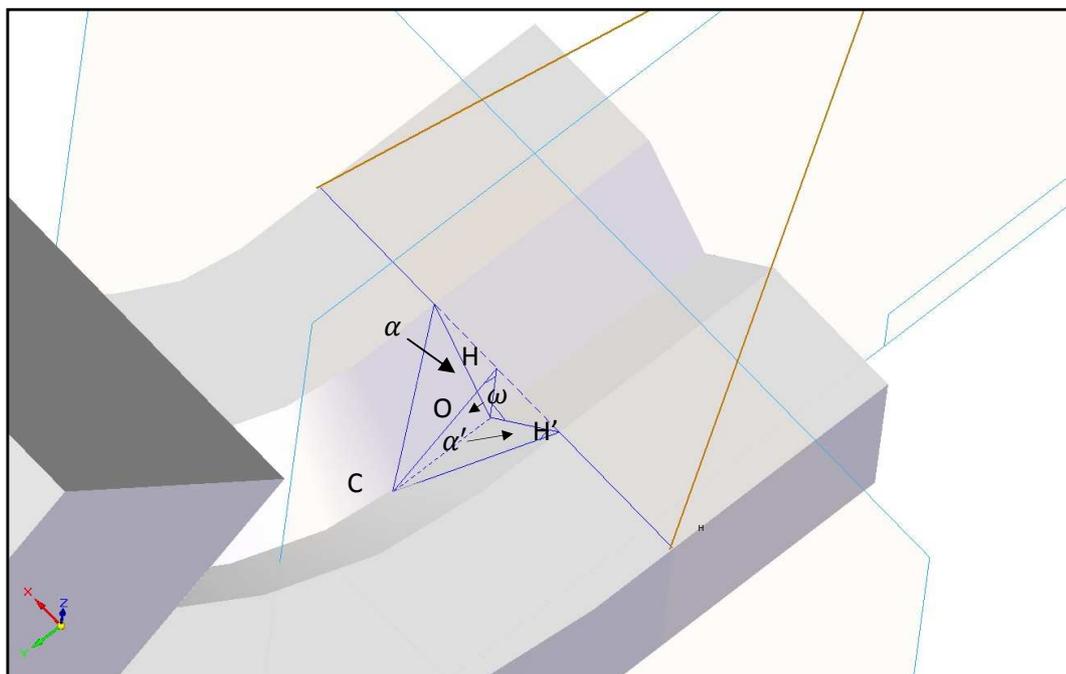


Figura 10 – rappresentazione delle proiezioni nel cianfrino

Risulta chiaro come i triangoli $C H O$ e $C H' O$ abbiano il lato CO in comune mentre i lati $C H'$ e $O H'$ rappresentano rispettivamente le ipotenuse dei triangoli

rettangoli $O H H'$ e $C H H'$ da cui è possibile dedurre quindi che $O H < O H'$ e $C H < C H'$.

Rappresentando i due triangoli su di uno stesso piano possiamo quindi costruire la seguente fig.11

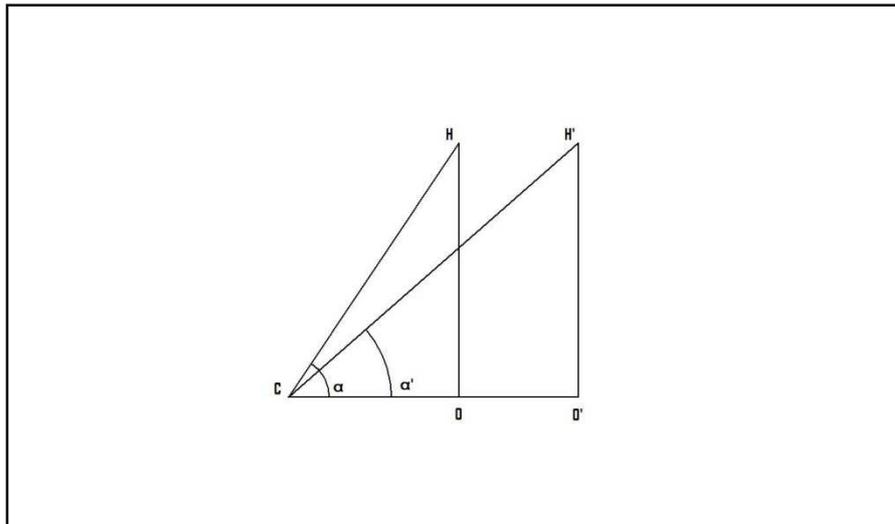


Figura 11 – rappresentazione nello stesso piano dei triangoli CHO e CH'O'

dalla quale risultano le seguenti relazioni trigonometriche:

$$\text{tang}(\alpha) = \frac{HO}{CO}$$

(14)

$$\text{tang}(\alpha') = \frac{H'O'}{CO'}$$

(15)

Considerando che $HO=H'O'$ e dividendo membro a membro la (15) con la (14) si ottiene:

$$\frac{\text{tang}(\alpha')}{\text{tang}(\alpha)} = \frac{CO}{CO'}$$

(16)

da cui

$$\text{tang}(\alpha') = \frac{CO}{CO'} * \text{tang}(\alpha) \quad (17)$$

considerando che risulta

$$CO' = \frac{CO}{\cos(\omega)} \quad (18)$$

dove con ω , ricordiamo, si è indicato l'angolo di semi apertura del cianfrino rispetto al piano verticale passante per l'asse del laser, possiamo scrivere

$$\alpha' = \text{arctang}(\cos(\omega) * \text{tang}(\alpha)) \quad (19)$$

Dove α' rappresenta il valore della proiezione dell'angolo α nel piano contenente la spalla del cianfrino da utilizzarsi nel calcolo delle grandezze lineari in tale piano.

Quindi possiamo scrivere in via del tutto generale

$$C' = \frac{\cos(\alpha')}{\text{sen}(\beta')} \quad (20)$$

dove con C' si è indicati il fattore di conversione generale in funzione di ω , α , β , inoltre risulta chiaro che $C' = C$ nel caso in cui $\omega = 0$ poiché $\begin{cases} \alpha' = \alpha \\ \beta' = \beta \end{cases}$

Infine la (12) diventa

$$(21) \quad X_{reale} = C' * X_{ccd}$$

dove con X si vuole indicare qualsiasi cateto od altezza reale da ottenere partendo dalla misurazione del corrispettivo visibile nella CCD.

Ambienti di lavoro software e metodica di utilizzo

Il concetto di visione artificiale viene ampiamente richiamato nella letteratura scientifica qualora metodiche di ispezione come la scansione 2D e 3D di profili siano necessari per l'acquisizione di parametri, in genere di carattere geometrico, dall'osservazione diretta di un oggetto. Un generico impianto di visione artificiale è composto da una parte hardware ed una parte software, in questo paragrafo si descriverà l'ambiente di lavoro software che ha permesso la realizzazione degli obiettivi prefissati in questa sede.

Gli obiettivi perseguiti in funzione del quale si è sviluppato il sistema di visione artificiale hanno come scopo l'automazione del processo di saldatura intesa come :

- Inseguimento automatico del giunto di saldatura
- Adattamento in tempo reale dei parametri di processo alle condizioni geometriche del cianfrino

Mentre in passato si era obbligati a fare una netta distinzione tra *sistemi solo configurabili* (firmware a bordo, scelta di algoritmi da una lista fissa) e *sistemi*

solo programmabili (sviluppo dell'eseguibile a partire da librerie, fino allo sviluppo di algoritmi ad hoc), oggi sono presenti sul mercato anche sistemi che permettono il transito dal configurabile (che implica il miglior rapporto prezzo/prestazione) al programmabile (che garantisce la massima flessibilità e possibilità di upgrade).

Il vantaggio fondamentale nell'uso dei software di visione artificiale, è la presenza dei tool per la localizzazione e l'analisi di pezzi e particolari nell'ambito del campo visivo della telecamera. Ciò costituisce il primo approccio a qualsiasi applicazione di visione (dalla più semplice operazione di *pick-and-place* alla più complessa funzione di verifica dell'assemblaggio).

Va ricordato che sebbene possa apparire piuttosto semplice la localizzazione di pezzi negli ambienti di lavoro, ciò può risultare estremamente difficile per i sensori di visione, dal momento che esistono molte condizioni variabili che possono alterare il modo in cui un pezzo viene percepito dal sistema. Problemi riguardanti la forte intensità della luce emessa dall'arco elettrico e degli spruzzi di saldatura, trovano soluzione quasi totale mediante l'uso congiunto di un filtro passabanda che ci consente la quasi esclusiva visione della traccia laser tagliando tutte le emissioni della torcia al di fuori della frequenza del laser, mediante uno schermo applicato direttamente alla torcia in maniera da limitare la diffusione di bagliori e spruzzi e mediante la successiva manipolazione dell'immagine ricevuta dalla CCD mediante l'utilizzo di algoritmo di filtraggio.

L'ambiente di sviluppo utilizzato per implementare il software è il Labview 8.0 della National instruments

Analisi dell' immagine

Il primo passo compiuto nella manipolazione ed analisi dell' immagine è stato quello di modificare la stessa mediante dei filtri digitali in maniera tale da poter pulire l' immagine ed avere una visione della luce strutturata quanto più nitida ed esente da disturbi possibile.

Tale operazione è stata eseguita ricorrendo ai seguenti algoritmi di filtraggio digitali:

- Extract RGB
- Brightness

Il primo consente di processare l' immagine direttamente acquisita dalla ccd e trasformarla in un formato a 8 bit come da fig.12-13(scala di grigi) ,condizione fondamentale per le manipolazioni successive

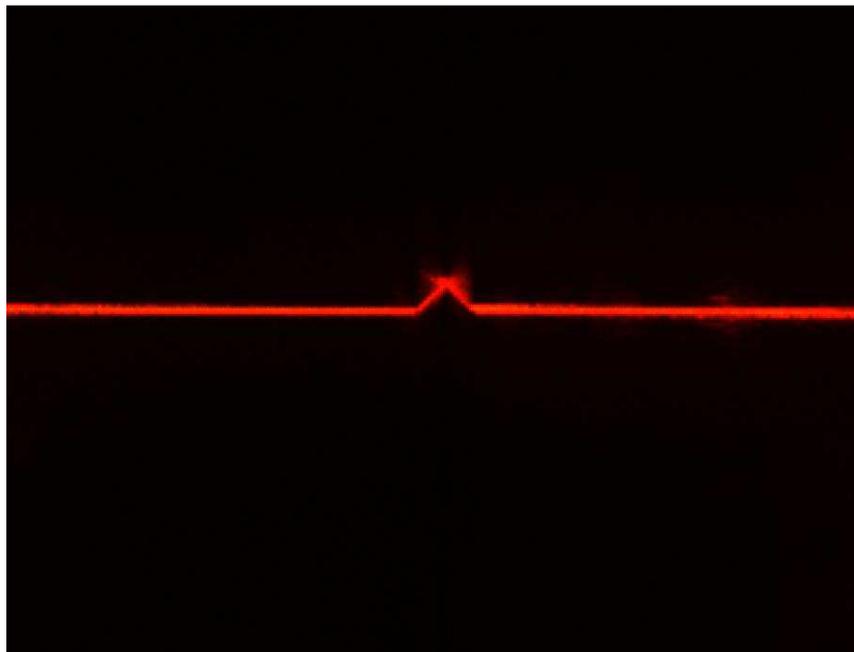


Figura 12 - immagine non filtrata rilevata dalla camera

Il secondo invece consente di pulire e definire l' immagine della luce strutturata, come da confronto tra fig.13 e fig.14

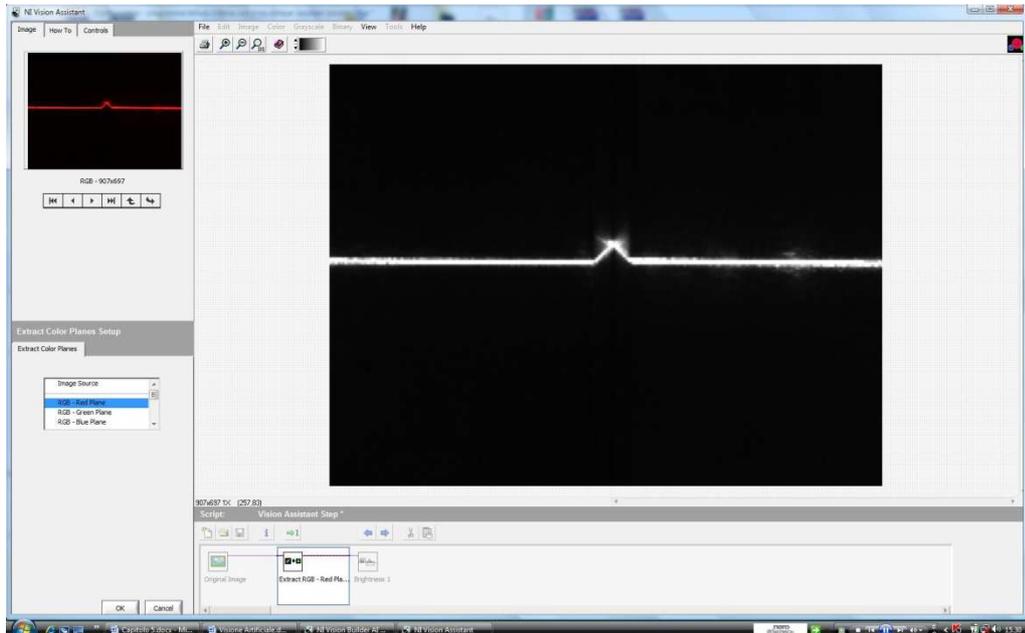


Figura 13 – immagine processata con filtro Extract RGB

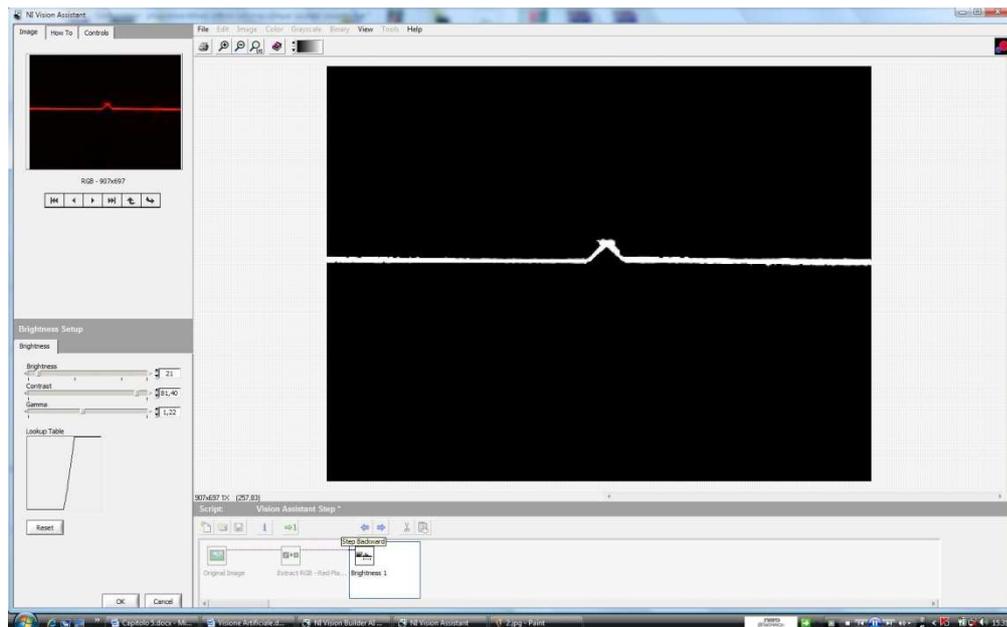


Figura 14– immagine processata con filtro Brightness

A questo punto, una volta ottenuta la qualità dell' immagine desiderata si è potuto procedere alla determinazione delle caratteristiche geometriche del cianfrino

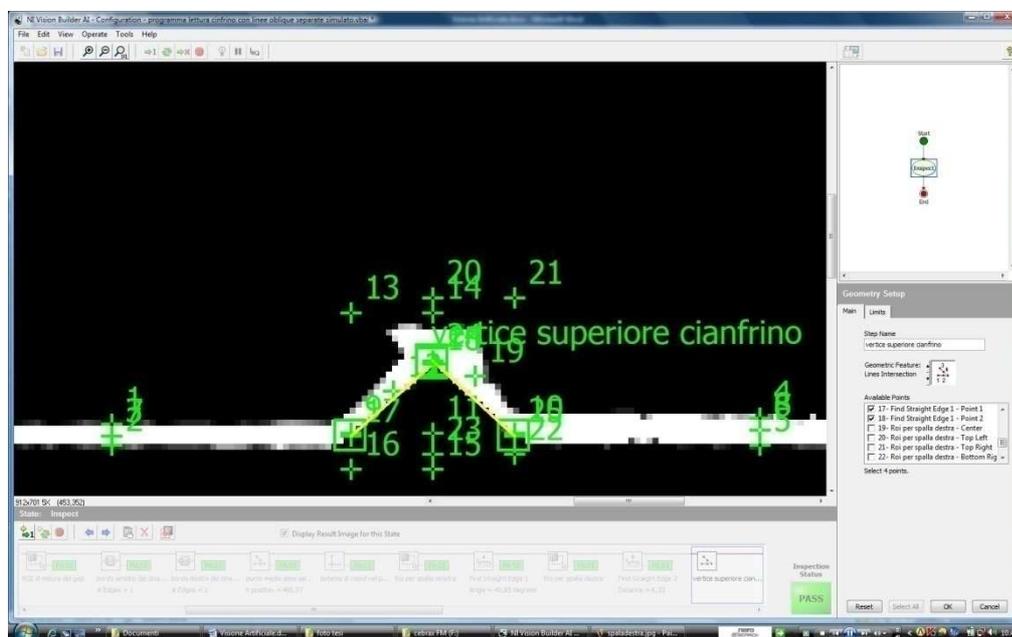


Figura 15 – identificazione vertice cianfrino

Dopo aver terminato la costruzione del triangolo rappresentante il cianfrino virtuale si procede alla misurazione di tutti i parametri necessari alla successiva determinazione analitica delle caratteristiche geometriche del cianfrino reale.

E' da precisare che l' immagine visibile nelle figure sopra mostrate non rappresenta la sezione reale del cianfrino ma bensì un' immagine della stessa ruotata di un certo angolo e che risulta essere funzione dell' inclinazione del laser e della camera.

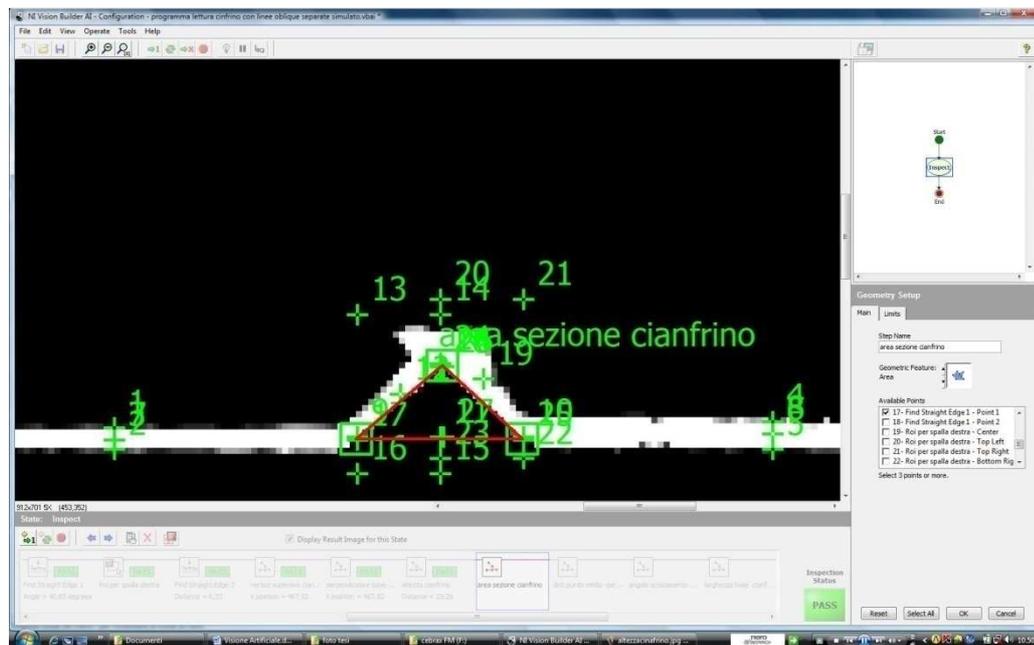


Figura 16 – costruzione cianfrino

Una volta determinate le grandezze di base (indicate nel paragrafo seguente) si procederà allo studio dell' errore commesso nella costruzione del modello e degli algoritmi necessari alla correzione dello stesso.

Valutazione errore lettura cianfrino

Nella valutazione dei parametri caratterizzanti la geometri del cianfrino, partendo dall' acquisizione visiva tramite CCD del laser ,si commette un errore concettuale la cui valutazione ed eventuale correzione avverrà per via analitica.

Come accennato la traccia del laser sullo schermo del computer è caratterizzata da un certo spessore, che cossi sponde allo spessore della linea tracciata sul cianfrino.

Di tale traccia si può scegliere di misurare i punti medi nello spessore oppure i punti di frontiera (fig. 25).

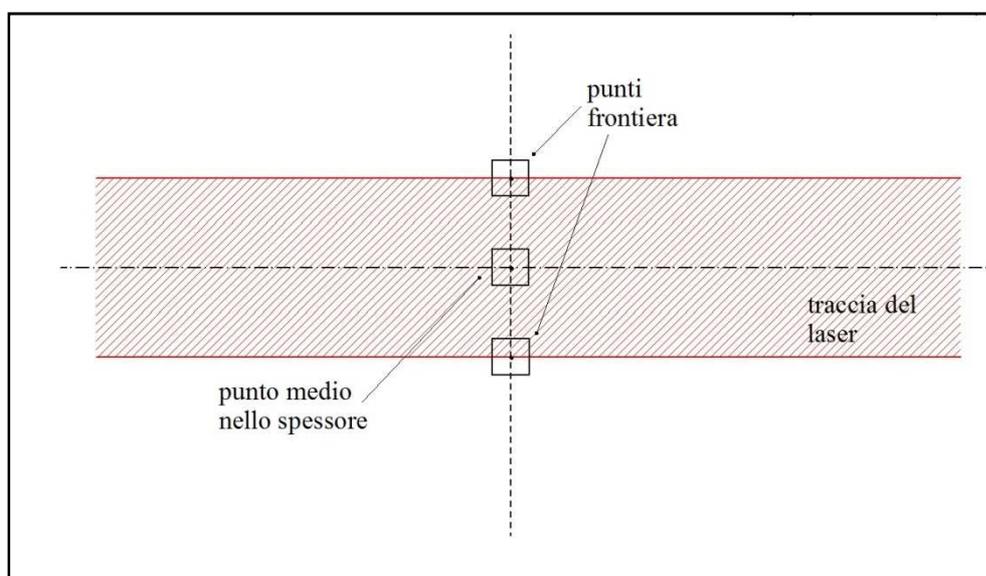


Figura 17 - individuazione punti su traccia laser

Tuttavia per questioni di affidabilità della misura si è scelto di misurare in taluni casi punti interni allo spessore ed in altri punti di frontiera.

Come descritto in precedenza la base del triangolo costituente il cianfrino (nel piano della CCD), è individuata dai due punti A' e B' giacenti sulla linea di

mezzeria della traccia t (fig.26). Il vertice C è invece individuato sulla frontiera stessa.

Per comodità di calcolo e per convenzione si decide di eseguire tutte le misure riferite ai punti di frontiera, caratterizzanti così il triangolo $A C B$.

I passaggi che seguono esprimono la geometria del triangolo $A B C$ in funzione di quella

“misurata” del triangolo $A' B' C'$.

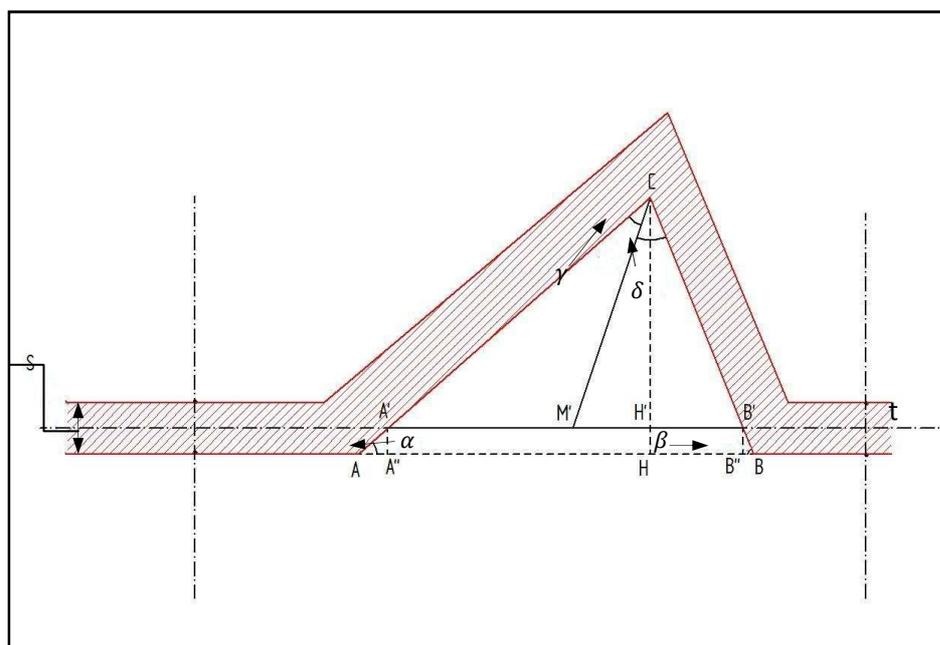


Figura 18 - Rappresentazione geometrica dello studio dell' errore

Sono noti i seguenti dati:

S = spessore traccia laser

α = angolo tra spalla sinistra cianfrino $A'C$ e retta t

β = angolo tra retta t e spalla destra cianfrino $C B'$

$H'C$ = altezza cianfrino schematizzato dal triangolo $A'C B'$

$A'M'$ = semiampiezza base cianfrino $A'C B'$

CM' = mediana cianfrino $A'CB'$

$A'B'$ = base cianfrino $A'CB'$

Si procede alla determinazione delle seguenti grandezze:

$$CH = CH' + \frac{S}{2} \quad (22)$$

$$AB = A'B' + \frac{S}{2} \cotg(\alpha) + \frac{S}{2} \cotg(\beta) \quad (23)$$

$$AC = AA' + A'C = \frac{S}{2 \sin(\alpha)} + A'C \quad (24)$$

$$CB = B'B + B'C = \frac{S}{2 \sin(\beta)} + B'C \quad (25)$$

Nel computo dell' area del cianfrino (nel piano della CCD) bisogna introdurre alla relazione (26)

superficie cianfrino costruito con algoritmi Labview :

$$S_{vccd} = \frac{A'B' * CH'}{2} \quad (26)$$

La superficie cianfrino corretta :

$$S_{rccd} = \frac{AB \cdot CH}{2} \quad (27)$$

$$S_{rccd} = S_{vccd} + S_{AA'A''} + S_{B''B'B} + S_{A''A'B'B''} \quad (28)$$

$$S_{rccd} = \frac{A'B' \cdot CH'}{2} + \frac{S}{2} \cotg(\alpha) * \frac{S}{2} * \frac{1}{2} + \frac{S}{2} \cotg(\beta) * \frac{S}{2} * \frac{1}{2} + A'B' * \frac{S}{2} \quad (29)$$

$$S_{rccd} = \frac{S}{2} * \left(\frac{S}{4} \cotg(\alpha) + \frac{S}{4} \cotg(\beta) + A'B' \right) + \frac{A'B' \cdot CH'}{2} \quad (30)$$

A titolo di esempio di riporta l' errore percentuale commesso, tralasciando di effettuare questa correzione, considerando il triangolo A' C B' invece di A C B.

$$\varepsilon = \frac{\frac{S}{2} * \left(\frac{S}{4} \cotg(\alpha) + \frac{S}{4} \cotg(\beta) + A'B' \right)}{\frac{S}{2} * \left(\frac{S}{4} \cotg(\alpha) + \frac{S}{4} \cotg(\beta) + A'B' \right) + \frac{A'B' \cdot CH'}{2}} * 100 \quad (31)$$

Si procede ora con un esempio numerico considerando, per semplicità, una traccia triangolare equilatera ed assegnando i seguenti valori ai parametri:

$$\left\{ \begin{array}{l} s = 1 \text{ mm} \\ \alpha = \beta = 60^\circ \\ CH' = 10 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Si procede al calcolo della dimensione A'B':

$$A'B' = 2 * 10 \text{ mm} * \tan(30^\circ) = 11.55 \text{ mm}$$

Sostituendo i valori numerici alle lettere nella (30) si ottiene:

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{2} * \left(\frac{1}{4} \cotg(60^\circ) + \frac{1}{4} \cotg(60^\circ) + 11.55 \right)}{\frac{1}{2} * \left(\frac{1}{4} \cotg(60^\circ) + \frac{1}{4} \cotg(60^\circ) + 11.55 \right) + \frac{11.55 * 10}{2}} * 100 = 9,30\%$$

L' errore commesso ,in termini di computo superficiale, considerando il triangolo A' C B' invece di A C B è pari al 9,30%

In fig.27 si riporta l' andamento grafico dell' errore al variare dello spessore S del laser e della profondità misurata C H' del cianfrino A' C B' mantenendo costanti gli angoli α e β

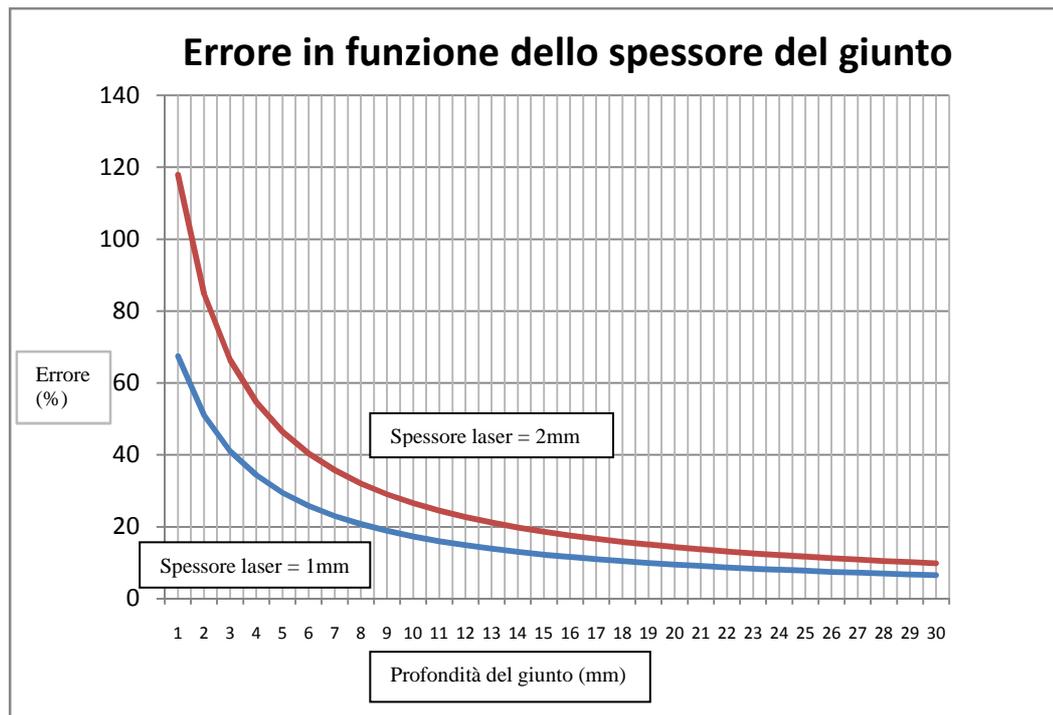


Figura 19 - andamento grafico dell' errore al variare dello spessore S del laser e della profondità

è evidente come, all' aumentare della profondità del cianfrino, tale errore tenda asintoticamente a zero.

La motivazione di ciò risiede nella scarsa influenza dello spessore del laser all' aumentare della geometria del cianfrino.

Determinazione della geometria reale del cianfrino

Un' ulteriore correzione si presenta necessaria qualora l' asse del giunto risulti obliquo rispetto all' inquadratura della telecamera.

Tale step viene eseguito partendo dalla geometria visibile nel piano della CCD

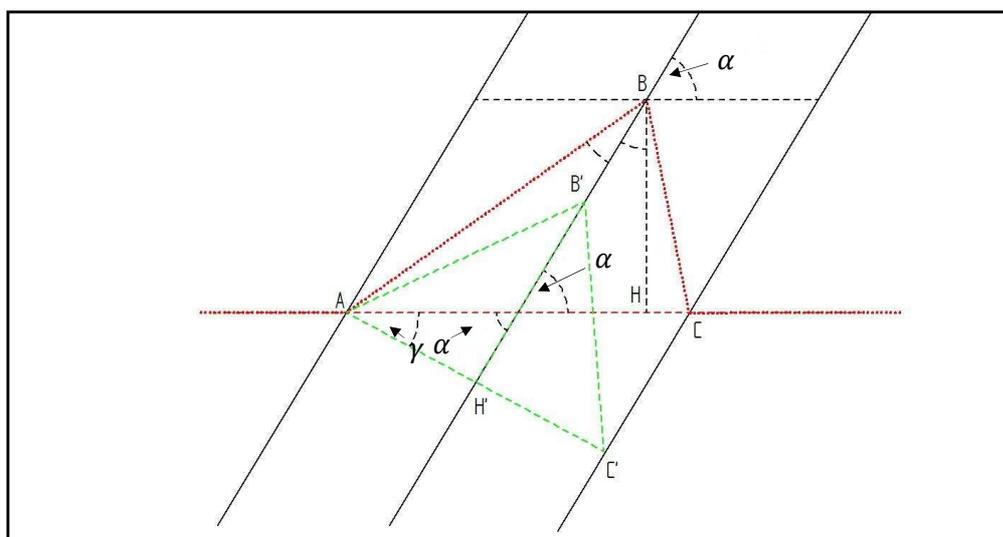


Figura 20 – passaggio alla sezione normale all' asse

rappresentata dal triangolo A B C in fig.28. L' obiettivo è quello di ricavare i dati per la costruzione del triangolo A B' C' rappresentante proprio la sezione del cianfrino corretta, tali dati sono ricavabili partendo dalla conoscenza dell' altezza HB e dell' angolo α , parametri del triangolo A B C noti, dai quali è possibile poi determinare quelli del triangolo A B' C':

$$(32) \quad BH = B'H'$$

$$(33) \quad \gamma = 90^\circ - \alpha$$

$$(34) \quad AC' = AC * \cos(\gamma)$$

Una volta note le caratteristiche geometriche del triangolo $A B' C'$ è possibile risalire alle caratteristiche reali del cianfrino mediante la seguente relazione già discussa in apertura capitolo :

$$X_{reale} = C' * X_{ccd}$$

L' uguaglianza (31) viene dimostrata facendo riferimento alla fig.29

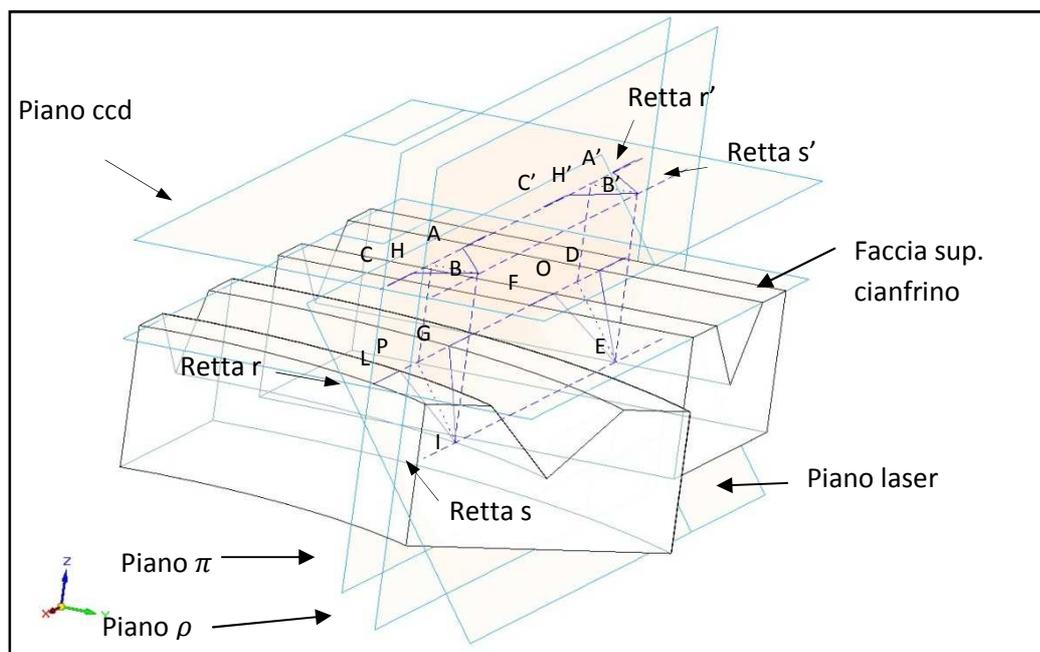


Figura 21 - schema dimostrazione uguaglianza (31)

I segmenti BH e $B'H'$ rappresentano la minima distanza esistente tra le rette r' ed s' tra loro parallele, la condizione di parallelismo tra le due rette garantisce l'uguaglianza di tali segmenti, mentre quella di perpendicolarità fa rispettivamente

di BH e B'H' l' altezza nel piano ccd (qui scelto per comodità parallelo alla faccia superiore del cianfrino) dei triangoli A B C e A' B' C'.

Il parallelismo tra le rette r' ed s' viene dimostrato considerando che entrambe nascono dall' intersezione del piano della ccd con due piani perpendicolari a quest' ultimo e paralleli tra loro, detti π e ρ .

La scelta di tali piani non è casuale infatti π contiene le basi dei quattro triangoli di cui due appartenenti al piano ccd e due appartenenti al piano laser, mentre ρ contiene i vertici dei rispettivi triangoli.

In sostanza i triangoli A' B' C' e A B C sono le proiezioni sul piano ccd, secondo una direzione perpendicolare a quest'ultimo (e quindi parallela ai piani π e ρ), dei triangoli D E F e G I L generati dall' intersezione del piano laser con i due cianfrini (uno ad asse lineare perpendicolare e l' altro curvo) .

Seam Tracker 2008

Il software utilizzato per l' analisi e la gestione dell' impianto prende il nome di Seam Tracker 2008, tale programma è stato formulato appositamente per la gestione di quest' impianto ed è compilato in ambiente labview ,date le caratteristiche applicative di quest' ultimo.

Il Seam Tracker ha il compito di analizzare l' immagine ricevuta dalla camera ccd ed attraverso l' individuazione di parametri gemometrici di guidare la torcia lungo il canfrino, inoltre si occupa della gestione dei parametri di saldatura quale intensità di corrente e tensione oltre alla velocità del filo ed all' accensione e spegnimento del laser.

La movimentazione della torcia è resa possibile grazie all' utilizzo di due schede driver appositamente costruite che , dietro input digitale del pc,provvedono all'

alimentazione dei motori del carro ,inoltre il programma presenta un' interfaccia grafica che consente il continuo monitoraggio e la eventuale modifica dei parametri di saldatura in tempo reale ed in maniera semplice ed intuitiva.

IL SISTEMA DI CONTROLLO DEI PARAMETRI

Come visto nel precedente paragrafo, allo stato attuale, i parametri di processo vengono impostati manualmente al termine della scansione.

Il sistema di controllo automatico dei parametri verrà realizzato con i dati ricavati da una campagna sperimentale. Questa ha come obiettivo la determinazione dei parametri ottimi di saldatura al variare della larghezza del meato di saldatura ed in funzione della geometria del cordone di saldatura.

L'obiettivo ultimo del lavoro di ricerca è quello di stabilire un criterio decisionale basato su tecniche neuro-fuzzy tramite l'uso di algoritmi di simulazione delle reti neurali combinati ad algoritmi fuzzy logic. A tal proposito sono in corso esperimenti volti ad utilizzare, a tal proposito, i dati (parziali) ricavati da campagne sperimentali per l'addestramento del sistema neuro-fuzzy.

SVILUPPO DEL SISTEMA AUTOMATICO DI SALDATURA GMA

In quanto precede, è stata evidenziata una strategia di automazione del processo di saldatura GMA. Il completamento del sistema automatico di saldatura prevede l'esecuzione di una ampia campagna di prove per costruire il data base di casi utili all'addestramento della rete Neuro – Fuzzy. Tale rete gestirà il controllo dei

parametri di saldatura in funzione dei dati geometrici forniti istante per istante dal sistema di acquisizione immagini. Anche il sistema di acquisizione delle immagini è oggetto di ulteriore sviluppo per garantire la necessaria affidabilità in situazioni complesse, sebbene a tutt'oggi sia in grado di soddisfare pienamente molte applicazioni industriali, con un costo molto limitato.

Nel paragrafo successivo è proposta una prima applicazione di rete Neuro Fuzzy, addestrata con alcuni dei dati ricavati dalle campagne sperimentali.

PROGETTO DI UNA RETE NEURO-FUZZY PER LA PREDIZIONE DELL'APPORTO TERMICO SPECIFICO AL BAGNO FUSO

Controllare l'apporto termico nel bagno fuso significa controllare soprattutto la diluizione del materiale di apporto con il metallo base e di conseguenza le caratteristiche meccaniche e di durezza del giunto.

L'apporto termico fornito dall'arco trasferito per unità di lunghezza di saldatura è espresso dalla formula:

$$Q = \frac{V \times I}{w} \times 60 \left(\frac{J}{cm} \right)$$

essendo:

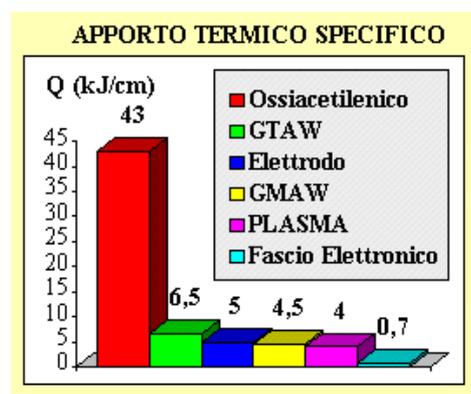


Figura 18 – Apporto termico specifico nei vari processi di saldatura -

- V = tensione arco trasferito (V)
- I = corrente arco trasferito (A)
- w = velocità di saldatura (cm/min)

L'energia trasferita al pezzo dipende anche dalla efficienza termica h dell'arco e può essere espressa come segue :

$$Q_w = h \times \frac{V \times I}{w} \times 60 \left(\frac{J}{cm} \right)$$

	EFFICIENZA TERMICA h ARCO (%)
TIG (GTAW)	25 - 50
Plasma (PTA)	50 - 60
MIG (GMAW)	60 - 70
Elettrodo (SMAW)	65 - 85
Arco sommerso (SAW)	95 - 98

L'efficienza termica dell'arco h viene determinata sperimentalmente con metodi calorimetrici.

In condizioni normali, l'efficienza termica della torcia non può essere calcolata esattamente poichè le perdite nell'arco dipendono in larga misura dalle condizioni operative (tipo e portata del gas di protezione, lunghezza d'arco, ecc).

Per queste ragioni viene preso in considerazione solo l'apporto termico fornito dall'arco trasferito come espresso dalla formula:

$$Q = \frac{V \times I}{w} \times 60 \left(\frac{J}{cm} \right)$$

Nel seguente lavoro è stata progettata una rete neuro-fuzzy con il toolbox ANFIS di Matlab addestrandola con parte dei sperimentali dell'ultima campagna effettuata e riportati in tabella 1

Tabella 2- Dati della campagna sperimentale -

Wire Speed	Gap	Travel speed	Current
15	1,0	550	367,3
15	1,0	600	404,4
15	1,0	650	381,9
15	1,5	550	372,0
15	1,5	600	372,4
15	1,5	650	388,9
15	2,0	550	375,6
15	2,0	600	372,2
15	2,0	650	369,5
16	1,0	550	387,5
16	1,0	600	404,9

16	1,0	650	392,8
16	1,5	550	382,5
16	1,5	600	389,8
16	1,5	650	395,8
16	2,0	550	353,1
16	2,0	600	387,7
16	2,0	650	387,4
17	1,0	550	379,9
17	1,0	600	406,8
17	1,0	650	413,6
17	1,5	550	399,2
17	1,5	600	391,7
17	1,5	650	394,8
17	2,0	550	378,4
17	2,0	600	397,2
17	2,0	650	397,0

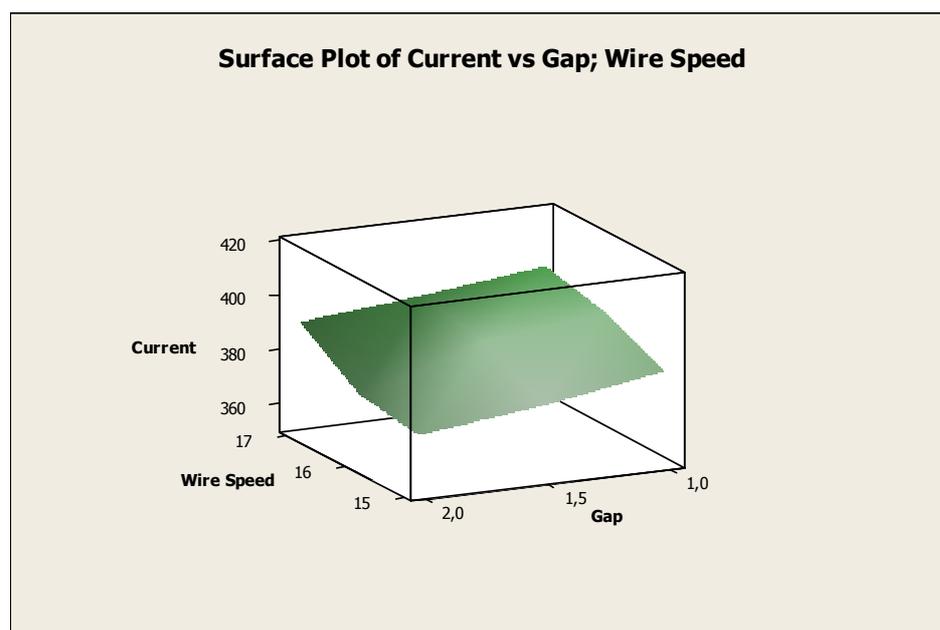


Figura 19 - Diagramma dei valori di corrente misurati al variare di Wire Speed e Gap nell'intervallo delle prove disponibili -

L'addestramento è stato effettuato con 23 delle 27 prove di cui si dispone, lasciandone 4 alla fase di check della rete:

Tabella 3 - Dati di addestramento -

Wire Speed	Gap	Travel speed	Current
15	1,0	550	367,3
15	1,0	600	404,4
15	1,0	650	381,9
15	1,5	550	372,0
15	1,5	600	372,4
15	1,5	650	388,9

15	2,0	550	375,6
15	2,0	600	372,2
15	2,0	650	369,5
16	1,0	550	387,5
16	1,0	600	404,9
16	1,0	650	392,8
16	1,5	550	382,5
16	1,5	600	389,8
16	1,5	650	395,8
16	2,0	550	353,1
16	2,0	600	387,7
16	2,0	650	387,4
17	1,0	550	379,9
17	1,0	600	406,8
17	1,0	650	413,6
17	1,5	550	399,2
17	1,5	600	391,7

Tabella 4 - Dati di check -

17	1,5	650	394,8
17	2,0	550	378,4
17	2,0	600	397,2
17	2,0	650	397,0

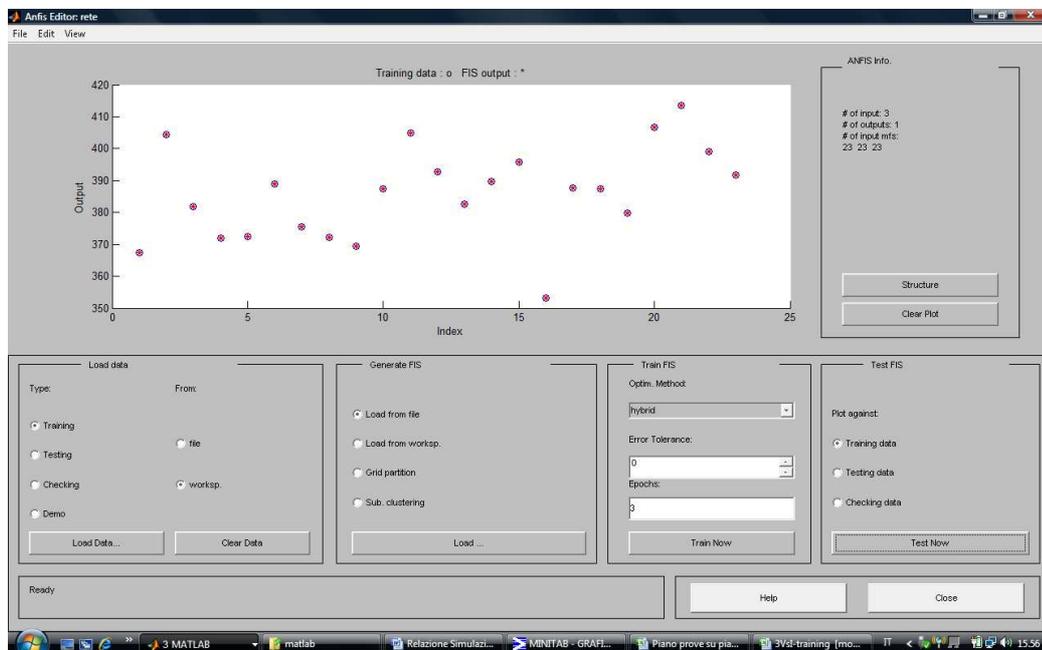


Figura 50 - dati di addestramento della rete -

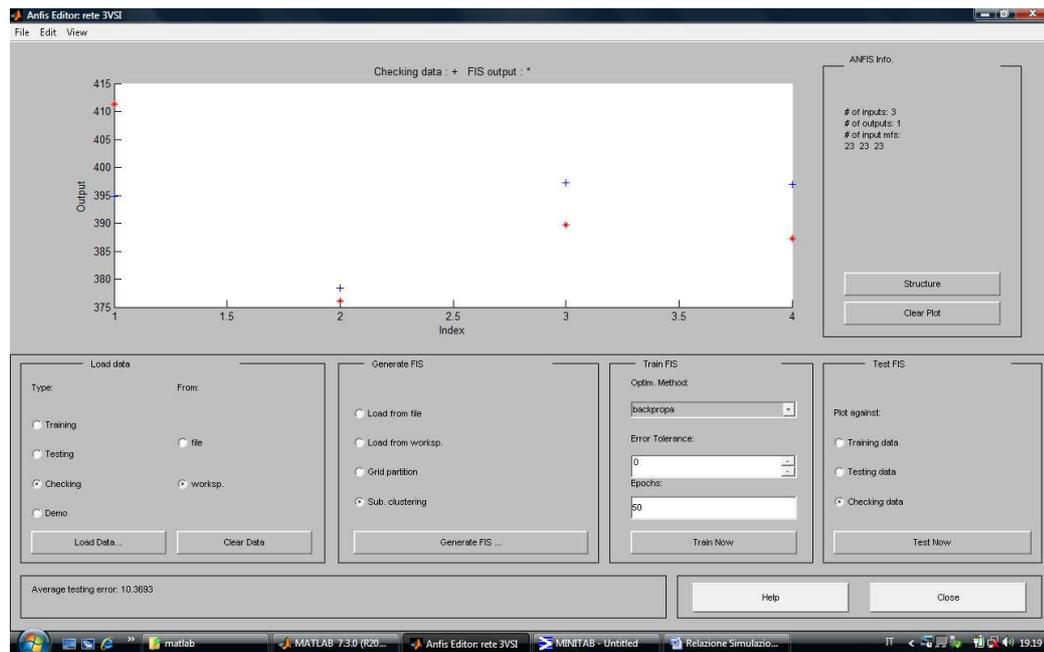


Figura 21 - confronto tra i dati di check misurati (blu) e calcolati (rosso) -

Si confrontino i dati in uscita di figura 22 con quelli misurati e presenti nel check di tabella 3, confronto che è visibile anche in figura 21



```
ca. Prompt dei comandi
Microsoft Windows [Versione 6.0.6000]
Copyright (c) 2006 Microsoft Corporation. Tutti i diritti riservati.

C:\Users\Emanuele>d:

D:\>fismain check rete.fis
411.248120619866
376.154960437338
389.715802499393
387.433825760689

D:\>
```

Figura 22- La rete compilata ed eseguibile autonomamente –

Inserendo il valore della corrente calcolato nella formula:

$$Q = \frac{V \times I}{w} \times 60 \left(\frac{J}{cm} \right)$$

Si ottiene il valore dell'apporto termico specifico.

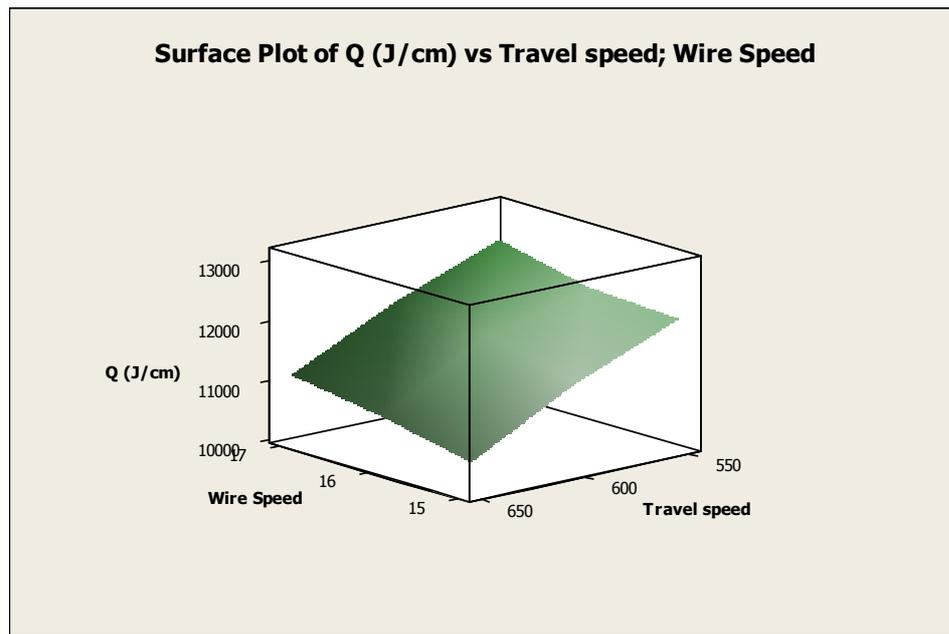


Figura 23 - Apporto termico specifico negli intervalli del piano di prove -

Prevedere e quantificare le distorsioni termiche a cui si v incontro potrebbe essere parte integrante di un sistema di controllo del processo.

V da s che la previsione di quella che sar la corrente durante il processo pu avere molte altre applicazioni per il controllo sia real time che a scansione preventiva.

CONCLUSIONI

Con questo lavoro di ricerca è stato dotato l'impianto di saldatura G.M.A.W. a disposizione di un software di ispezione artificiale, pervenendo, così, alla completa automazione del processo di saldatura stesso.

L'idea di effettuare un lavoro riguardante questo argomento è nata dalla necessità di automatizzare la saldatrice in esame. Gli inconvenienti che si presentano in questo caso sono numerosi ed il principale è quello di far coincidere l'asse della torcia di saldatura con quello del gap tra i lembi da saldare.

L'obiettivo fondamentale del processo di saldatura GMAW automatizzato è quello di eliminare questo tipo di inconveniente per ottenere così giunzioni con buone caratteristiche meccaniche con grande rapidità e, quindi, con alta velocità di deposizione del metallo d'apporto.

Implementando sull'impianto di saldatura GMAW, costituito da una telecamera e un sistema di illuminazione, si è potuto istruire tale sistema con l'ausilio di opportuni software, in modo da fare riconoscere in tempo reale il giunto presente tra gli elementi che si intende saldare.

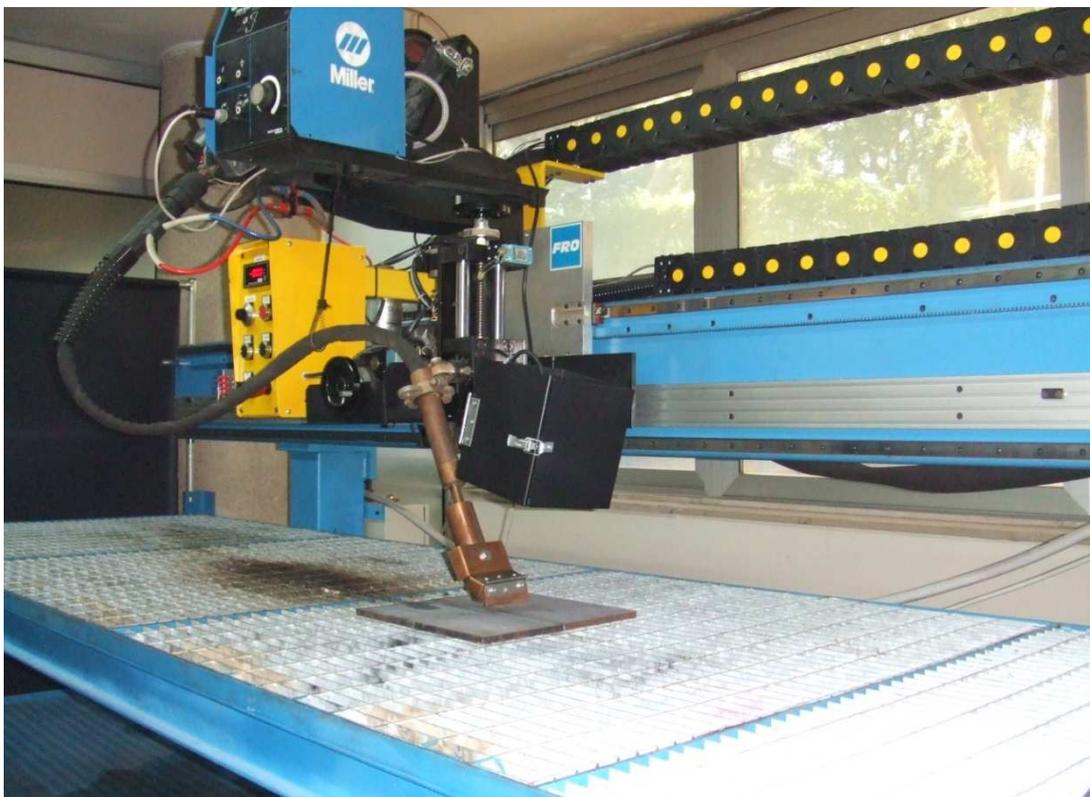
L'ausilio poi di un altro software della National Instruments, il LABVIEW 8.0, ha reso possibile la realizzazione di un ulteriore software per la movimentazione della torcia dell'impianto in modo tale che questa sia in grado di seguire il giunto presente tra gli elementi da saldare durante la fase di saldatura.

Le modifiche apportate alla torcia di saldatura con l'utilizzo dello scudo di copertura, hanno permesso di risolvere in buona parte i problemi relativi alla forte emissione di luce emanata dall'arco elettrico che si instaura tra la torcia e le piastre e si è rivelato una buona protezione anche dagli schizzi di saldatura.

Tali modifiche si sono mostrate indispensabili per permettere al sistema di visione di inquadrare la torcia di saldatura in tempo reale in modo da permettere lo sviluppo dei due programmi di ispezione.

In figura è mostrato nel suo complesso l'intero impianto di saldatura G.M.A.W.

:



L' impianto di saldatura oggetto di questo lavoro di tesi

BIBLIOGRAFIA

- *F. Ayres* - Theory and problems of projective geometry - Schaum's Outline Series in Mathematics. McGraw-Hill, 1967.
- *J. L. Barron, D. J. Fleet & S. Beauchemin* - Performance of Optical Flow Techniques - International Journal of Computer Vision, vol. 12, no. 1, pages 43-77, 1994.
- *B. Caprile & V. Torre* - Using Vanishing Points for Camera Calibration - International Journal of Computer Vision, vol. 4, pages 127-140, 1990.
- *O.D. Faugeras & F. Lustman* - Motion and Structure from Motion in a Piecewise Planar Environment - International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, vol. 2, pages 485-508, 1988.
- *O.D. Faugeras & S. Maybank* - Motion from point matches: multiplicity of solutions - International Journal of Computer Vision, vol. 4, no. 3, pages 225-246, June 1990.
- *O.D. Faugeras* - Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint - The MIT Press, Cambridge, MA, 1993.
- *Fusiello, V. Roberto & E. Trucco* - Efficient Stereo with Multiple Windowing - In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 858-863, Puerto Rico, June 1997. IEEE Computer Society Press.
- *Fusiello, E. Trucco & A. Verri* - A Compact Algorithm for Rectification of Stereo Pairs - Machine Vision and Applications, vol. 12, no. 1, pages 16-22, 2000.
- *K. P. Horn & B. G. Schunk* - Determining Optical Flow - Artificial Intelligence, vol. 17, pages 185-203, 1981.
- *B.K.P. Horn & K. Ikeuchi* - Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries - Artificial Intelligence, vol. 17, pages 141-184, 1981.
- *D. Lucas & T. Kanade* - An Iterative image registration Technique with an Application to Stereo Vision - In Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981.
- *Q.-T. Luong, R. Deriche, O.D. Faugeras & T. Papadopoulos* - On Determining the Fundamental Matrix: Analysis of Different Methods and Experimental Results -

Rapport technique 1894, Unit'e de recherche INRIA Sophia-Antipolis, April 1993.

- *J.A. Noble. Finding Corners* - Image and Vision Computing, vol. 6, pages 121–128, May 1988.
- *Phong* - Illumination for computer generated pictures - Communications of the ACM, vol. 18, no. 6, pages 311–317, 1975.
- *W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling & B. P. Flannery* - Numerical recipes in C: The art of scientific computing - Cambridge University Press, second edition, 1992.
- *L. Robert* - Camera Calibration Without Feature Extraction - Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 63, no. 2, pages 314–325, March 1996.
- *L. Robert, C. Zeller, O.D. Faugeras & M. Hebert* - Applications of Non-Metric Vision to Some Visually-Guided Robotics Tasks - In Y. Aloimonos, editeur, Visual Navigation: From Biological Systems to Unmanned Ground Vehicles, chapitre 5, pages 89–134. Lawrence Erlbaum Associates, 1997.
- *Tomasi & T. Kanade* - Shape and motion from image streams under orthography a factorization method - International Journal of Computer Vision, vol. 9, no. 2, pages 137–154, November 1992.
- *P.H.S. Torr & D. W. Murray* - The Development and Comparison of Robust Methods for Estimating the Fundamental Matrix - International Journal of Computer Vision, vol. 24, no. 3, pages 271–300, September 1997.
- *Trucco & A. Verri* - Introductory techniques for 3-D computer vision - Prentice-Hall, 1998.
- *R. Tsai* - A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses - IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, no. 4, pages 323–344, August 1987.
- *P. S. Tsai & M. Shah* - Shape from Shading Using Linear Approximation - Image and Vision Computing, vol. 12, no. 8, October 1994.
- *Q. Zheng & R. Chellappa* - Estimation of Illuminant Direction, Albedo, and Shape from Shading - IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 13, no. 7, pages 680–702, 1991.

- *G. Agapiou, C. Kasiouras, A.A. Serafetinides* – A detailed analysis of the MIG spectrum for the development of laser-based seam tracking sensor
- *Matthew Miller, Bao Mi, Akio Kita, I.Charles Ume* – Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring
- *J. S. Kim, Y. T. Son, H. S. Cho e K. I. Koh* – A robust visual seam tracking system for robotic arc welding
- *Pyunghyun Kim, Sehun Rhee, Chang Hee Lee* □ Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor
- *K.Y. Bae, T.H. Lee e K.C. Ahn* – An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe
- *S. Serpe* □ Sviluppo di un sistema di visione artificiale per l' inseguimento del giunto di saldatura □ Napoli 2007
- *D. Marati* – Saldatura GMAW ad alto tasso di deposizione: Sviluppo di un sistema di acquisizione e controllo per un impianto sperimentale – Napoli, 2006
- *F. Soria* – Saldatura GMAW ad alto tasso di deposizione: Sviluppo di un sistema di visione artificiale per il rilievo geometrico del giunto di saldatura – Napoli, 2006
- *E. Sarno* – Saldatura GMAW: Allestimento e collaudo di un impianto sperimentale – Napoli, 2005
- *L. Nele* – Appunti dalle lezioni del corso di tecnica della saldatura e delle giunzioni – Napoli, 2004

PAGINE WEB CONSULTATE

- www.lansec.it
- www.ni.com
- www.jacksonsafety.com
- www.speedglas.com
- www.directindustry.com
- www.optrel.com
- www.cognex.it
- www.licoitalia.it

- www.mssource.it
- www.siemens.it
- www.sidea.it
- www.matrox-vision.de
- www.photron.com
- www.neuricam.com