

**Programma Nazionale di Ricerca
SPI - Sistemi di Produzione Innovativi**

Tema 5

Sistema automatizzato flessibile e adattativo di saldatura

Linea 3.1 – Controllo di processo: controllo on-line

Relazione finale

Premessa

Sulla base degli accordi di collaborazione con gli altri partner del progetto, quest'attività di sviluppo è stata orientata all'integrazione tra le diverse parti del sistema finale di saldatura robotizzata allo scopo di realizzare un dimostratore per un caso di interesse industriale: la placcatura di lastre con saldatrice robotizzata MIG/MAG presso l'Ansaldo Energia di Legnano (MI).

Per fare questo è stato necessario, tra l'altro, progettare e realizzare un'attrezzatura completa per lo svolgimento di prove sperimentali di saldatura presso detto partner industriale, onde poter disporre di immagini correttamente acquisite. Secondo quanto stabilito sono stati analizzati: la pozza fusa e il cordone in fase di solidificazione, ed è stato creato un atlante di immagini ottenute da saldature create artificialmente con difetti.

Sono stati analizzati i problemi di integrazione tra il sistema di analisi dell'immagine del giunto saldato messo a punto e il sistema di acquisizione sviluppato dall'Istituto RTM di Vico Canavese (Ivrea).
Sulle immagini acquisite con il sistema sviluppato e su quelle fornite dall'Istituto RTM sono stati implementati e testati gli algoritmi di analisi ed è stata individuata una possibile strategia di controllo.
E' stata inoltre ampliata e aggiornata la ricerca bibliografica.

Indice

1- STATO DELL'ARTE	5
1.1 INTRODUZIONE	5
1.2 SINTESI SUI METODI DI CONTROLLO CON ESAME VISIVO APPLICATI ALLE SALDATURE: CONTROLLO VISIVO OFF-LINE ED ON-LINE.....	7
1.1.1- Esame visivo per l'ispezione del giunto freddo: controllo off-line	7
1.1.2- Esame visivo per il controllo di processo: controllo on-line	9
<i>Considerazioni sull'uso dell'analisi di immagini per il controllo on – line della saldatura: confronto con altri metodi.....</i>	<i>14</i>
1.1.3- Altri metodi di controllo on – line per il riconoscimento di difetti del cordone: stato di avanzamento della ricerca	15
1.1.4- Applicazione del controllo con ultrasuoni.....	15
1.1.5- Applicazione di metodi di analisi dello spettro infrarosso	16
1.1.6- Applicazione dell'analisi del rumore dell'arco	17
1.1.7- Applicazione di misure di temperatura, tensione e corrente	17
1.3 INDICE DEGLI ARTICOLI.....	18
1.4 CONCLUSIONI SULLO STATO DELL'ARTE	21
2- HARDWARE PER L'ACQUISIZIONE: IMMAGINI E PROBLEMATICHE.....	26
2.1- IMMAGINE DELLA POZZA E DEL CORDONE DI SALDATURA: CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DI LUMINOSITÀ.....	26
2.2- ELIMINAZIONE DEL DISTURBO DERIVANTE DALL'EMISSIONE DELL'ARCO ELETTRICO: ANALISI DELLO SPETTRO DI EMISSIONE E SCELTA DEI FILTRI.....	28
2.2.1- Caratteristiche di emissione dell'arco elettrico di saldatura.....	28
2.2.2- Scelta dei filtri per l'acquisizione delle immagini della pozza.....	29
2.3- HARDWARE PER ACQUISIZIONE IMMAGINI REALIZZATO DA RTM.....	30
2.4- HARDWARE PER L'ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI REALIZZATO DA QUALITAL.....	32
2.5- MODALITÀ DI ACQUISIZIONE: FREQUENZA DI ACQUISIZIONE E OPZIONE NON INTERLACCIATO	33
2.6- COMUNICAZIONE TRA HARDWARE RTM E HARDWARE QUALITAL.....	35
3- PROVE SPERIMENTALI: IL CASO DELLA PLACCATURA	36
INTRODUZIONE	36
3.1- TIPOLOGIA DI SALDATURA SVOLTA DA ANSALDO ENERGIA E DIFETTI TIPICI.....	36
3.2- ATTREZZATURA DI SALDATURA: ROBOT E MACCHINA SALDATRICE	38
3.3- DESCRIZIONE DELLE PROVE SVOLTE.....	39
3.3.1- <i>Prove di saldatura con sensore Qualital (Legnano – 20/09/1999)</i>	<i>39</i>
3.3.2- <i>Prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 15/07/1999)</i>	<i>45</i>
3.3.2- <i>Prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 20/09/1999)</i>	<i>47</i>
3.4- RISULTATO DELLE PROVE: DESCRIZIONE DELLE SEQUENZE DI IMMAGINI OTTENUTE	48
3.4.1- <i>Immagini ottenute durante le prove svolte con il sensore Qualital (Legnano, 20/09/1999)</i> ..	<i>48</i>
3.4.2- <i>Immagini ottenute durante la prima serie di prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 15/07/1999)</i>	<i>48</i>
4- SVILUPPO SOFTWARE E HARDWARE	54
4.1- SVILUPPO SOFTWARE.....	54
4.2- PROGRAMMA PER IL CONTROLLO DI SALDATURE.....	55
4.3- ELABORAZIONE ED ESTRAZIONE DELLE FEATURE	58
4.4- CALIBRAZIONE DEL SISTEMA.....	60
4.5- ALCUNE PROBLEMATICHE AFFRONTATE NELLO SVILUPPO DEL SOFTWARE.....	61
4.5.1- <i>Modalità interlacciato e non</i>	<i>61</i>
4.5.2- <i>Acquisizione e visualizzazione di sequenze</i>	<i>63</i>
4.5.3- <i>Scelta della frequenza di acquisizione</i>	<i>64</i>
4.6- COMUNICAZIONE DEL PROGRAMMA SVILUPPATO IN VISUAL BASIC CON MATLAB.....	64

5- ALGORITMI DI ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI: ANALISI DELLA POZZA FUSA	66
5.1- ALGORITMI DI AUTOCALIBRAZIONE DEL SISTEMA	66
5.2- ALGORITMI PER L'ESTRAZIONE DI FEATURE DALL'IMMAGINE DELLA POZZA DI SALDATURA.....	67
5.2.1- <i>La binarizzazione: definizione del livello di soglia</i>	67
5.3- ALGORITMI TESTATI.....	73
5.3.1- <i>Individuazione della soglia di binarizzazione in base alla larghezza dal giunto freddo</i>	73
5.3.2- <i>Analisi delle derivate</i>	74
5.3.3- <i>Metodo della soglia estratta dallo sfondo</i>	75
5.4- SCELTA DELLE FEATURE.....	75
5.4.1- <i>Asimmetria</i>	77
5.4.2- <i>Spruzzi</i>	78
5.4.3- <i>Instabilità dell'arco</i>	78
5.4.4- <i>Fumo</i>	79
5.4.5- <i>Scoria</i>	79
5.4.6- <i>Modalità di trasferimento</i>	79
5.4.7- <i>Fluidità</i>	80
5.4.8- <i>Lunghezza effettiva del filo</i>	80
5.5- DISCUSSIONE.....	81
6- ALGORITMI DI ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI ACQUISITE: ANALISI DEL PROFILO DEL CORDONE	82
6.1- ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI DEI CORDONI.....	82
6.2- ESTRAZIONE DEL PROFILO	83
6.3- LA REGION OF INTEREST (ROI)	83
6.4- RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE DEL PROFILO	85
6.5- PROBLEMI RELATIVI ALLA FASE DI BINARIZZAZIONE. LOGICA DI RICOSTRUZIONE DEL PROFILO CONTINUO.....	86
6.6- PRE-PROCESSING DELLE IMMAGINI DEL PROFILO DEL CORDONE ACQUISITE CON IL SENSORE QUALITAL.....	87
6.6- PRE-PROCESSING DELLE IMMAGINI ACQUISITE CON IL SENSORE RTM.....	91
6.6- ALGORITMI PER L'ESTRAZIONE DI FEATURE DALLE IMMAGINI DEL PROFILO DEL CORDONE DI SALDATURA	92
6.7- ESAME VISIVO DELLE SEQUENZE "COLD"	93
6.7.1- <i>Porosità e ossidazioni</i>	94
6.7.2- <i>Irregolarità di larghezza, altezza e area: aumento o diminuzione</i>	95
6.7.3- <i>Separazione o sovrapposizione di cordoni adiacenti: irregolarità di raccordo tra due cordoni adiacenti</i>	96
6.8- CORRELAZIONE TRA FEATURE E DIFETTI DEL GIUNTO.....	97
6.8.1- <i>Introduzione</i>	97
6.8.2- <i>I feature points</i>	97
6.8.3- <i>Interpolazione del profilo del giunto</i>	99
6.8.4- <i>Stick off</i>	100
6.8.5- <i>Airjet</i>	102
6.8.6- <i>Area della sezione del giunto</i>	104
6.8.7- <i>Semilarghezza del giunto</i>	106
6.8.8- <i>Pendenza del profilo del giunto nel punto di distacco</i>	106
6.9- CAUSE DI VARIABILITÀ DEI DATI	108
6.10- DISCUSSIONE.....	109
7- IL CONTROLLO DEL PROCESSO	110
7.1 INTRODUZIONE	110
7.2 FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA DI CONTROLLO AUTOMATICO: FASE DI AUTOAPPRENDIMENTO E SEGNALI DI ERRORE	111
7.3 STRATEGIA DEL CONTROLLO	112
8- CONCLUSIONI	115

1- Stato dell'arte

1.1 Introduzione

In questo capitolo vengono riportate alcune considerazioni sul possibile sviluppo dei sistemi di visione artificiale nel controllo on-line di saldature robotizzate sulla base dell'attuale stato di avanzamento della ricerca.

Una parte dei riferimenti bibliografici è stata riportata e dettagliata nella relazione finale relativa alla fase precedente (progetto SPI, tema 5, linea 2.3) e sono qui inclusi per completezza. Alcuni dei principali risultati scientifici relativi alla precedente fase del progetto sono stati pubblicati al IV Convegno dell'Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica.

Le fonti per il reperimento del materiale bibliografico sono state l'elenco degli abstracts disponibili su banca dati Compendex e una raccolta di articoli e presentazioni di sistemi commerciali di saldatura fornita da RTM.

La ricerca su Compendex di articoli rilevanti ai fini dello studio condotto è stata realizzata secondo le seguenti combinazioni di parole chiave:

- 'IMAGE' or 'VISION' and 'WELDING' or 'SOLDERING', che ha fornito circa 200 risultati;
- altre combinazioni con 'WELDING', come: 'WELDING' and 'DEFECTS' or 'AUTOMATION' or 'CONTROL', ecc.; queste hanno fornito circa 600 risultati.

Naturalmente da questa lista di circa 800 oggetti, gli articoli sono stati selezionati sulla base dell'interesse dell'abstract. Per la scelta sono stati presi in considerazione tutti gli articoli che trattavano dei temi seguenti:

- articoli su ricerche e applicazioni riguardanti il controllo (sia di qualità che di posizionamento e di moto) con tecniche visive per sistemi di saldatura robotizzati ;
- articoli sulla correlazione tra parametri del processo di saldatura e difetti del cordone saldato o caratteristiche geometriche della pozza;
- articoli sull'aspetto e sulle caratteristiche fisiche della zona di saldatura(in particolare, sull'emissione dell'arco elettrico e sulla possibile eliminazione di questa fonte di disturbo).

I criteri di scelta hanno portato a selezionare circa 50 oggetti, dei quali sono stati reperiti ed esaminati 19 articoli; i rimanenti non sono stati ricercati sia perché giudicati di minore rilievo e anche per la difficoltà nel rintracciare le riviste che li contenevano.

Dall'esame dei 19 articoli reperiti, solo 11 sono sembrati di interesse rilevante ai fini dello studio condotto.

Dalla raccolta fornita da RTM, che conteneva 17 oggetti, 3 articoli sono sembrati rilevanti, tutti riguardanti sistemi di controllo di inseguimento del giunto con tecniche di visione artificiale o triangolazione; l'interesse si è concentrato in questo caso sulla descrizione dell'architettura dei sensori visivi (tipo di componenti ottici utilizzati).

In definitiva sono stati individuati i seguenti gruppi di articoli:

1. un articolo che tratta specificamente della correlazione tra parametri del processo e caratteristiche geometriche della pozza;
2. cinque articoli riguardanti l'osservazione dell'aspetto del bagno di saldatura (larghezza, lunghezza, area) per un controllo di buona penetrazione;
3. un articolo sulla misura del profilo del cordone di saldatura, per rilevarne i parametri geometrici;
4. due articoli sull'influenza della luce dell'arco sull'acquisizione delle immagini;
5. 14 articoli su sistemi di inseguimento del giunto, che approfondiscono la trattazione dei problemi di illuminazione ed acquisizione delle immagini.

La lettura degli articoli suddetti permette di concludere che lo stato attuale dei sistemi commerciali è piuttosto sviluppato per quanto riguarda l'acquisizione e l'interpretazione delle immagini del cianfrino per l'inseguimento del giunto.

Lo stato attuale della ricerca sul controllo visivo on-line di qualità per i processi di saldatura riguarda la sperimentazione di sistemi di ripresa del bagno di saldatura, allo scopo di fornire informazioni riguardo alla bontà della penetrazione del giunto. Invece non risulta che siano stati sviluppati sistemi capaci di indagare sulla presenza di altri difetti della saldatura tramite la vista della pozza. Per quanto riguarda invece il controllo sul cordone, sono già esistenti metodi automatici di misura delle caratteristiche geometriche; finora le applicazioni hanno riguardato solo il giunto ormai freddo.

Dal materiale bibliografico, sono state tratte informazioni importanti riguardo ai componenti ottici che possono essere utilizzati per acquisire immagini significative ed utili per il controllo, sia della pozza che del giunto (ancora non completamente raffreddato), e riguardo ai metodi di interpretazione delle immagini stesse.

Un'altra osservazione interessante è il ricorrere frequente degli stessi nomi di autori e ricercatori nella raccolta; in particolare, è possibile individuare due gruppi che compiono ricerca molto avanzata sui temi della visione artificiale applicata al controllo on-line di saldature robotizzate:

- il *Welding Research and Development Laboratory*, presso il *Center for Robotics and Manufacturing Systems and Department of Mechanical Engineering* della University of Kentucky (Lexington, KY); gli autori degli articoli sui lavori prodotti presso questo centro di ricerca sono R. Kovacevic e Y.M. Zhang;
- il *Department of Electrical Engineering and Electronics* presso la University of Liverpool, UK; gli autori sono J.Lucas, J.S. Smith, R.A. White, D.A. Stone.

Naturalmente, questi centri di ricerca sono presenti in Internet con i loro siti, che riportano alcune interessanti informazioni sugli argomenti di studio e sulle più recenti pubblicazioni (articoli, tesi, ecc.); l'approfondimento della ricerca bibliografica 'cartacea' con una ricerca sulla rete ha fornito l'indicazione dei seguenti siti da consultare:

- www.robots.eeng.liv.ac.uk, dell'Università di Liverpool;
- www.crms.engr.uky.edu, dell'Università del Kentucky;
- ecvnet.lira.dist.unige.it (ovvero: afrodita.lira.dist.unige.it), sito di riferimento di ECVNet, rete europea di collegamento fra diversi centri di ricerca sulla visione artificiale;
- infine, si possono trovare indirizzi dei siti di numerosi gruppi di ricerca mondiali nell'ambito di analisi dell'immagine presso una pagina della Carnegie Mellon University: www.cs.cmu.edu/~cil/v-groups.html, tra i quali alcuni che compiono applicazioni delle tecniche di visione artificiale al controllo di saldature.

1.2 Sintesi sui metodi di controllo con esame visivo applicati alle saldature: controllo visivo off-line ed on-line

L'esame visivo viene praticato da parte di operatori specializzati, ma con scarsa diffusione, sul cordone freddo al termine della lavorazione; infatti, esso presenta caratteristiche di *incompletezza* e *soggettività* che non lo rendono assolutamente affidabile.

Tuttavia, lo sviluppo delle tecniche di analisi dell'immagine tramite elaboratore ha suggerito la possibilità di un'evoluzione di questa tecnica di controllo nella direzione dell'automazione (si descrive più avanti uno studio sull'applicazione della visione artificiale alla misura di profilo del cordone di saldatura) e nell'applicazione al controllo di processo: esistono numerosi gruppi di ricerca che si occupano degli studi riguardo a questo argomento, dei quali si parla nel seguito.

1.1.1- Esame visivo per l'ispezione del giunto freddo: controllo off-line

La tecnica di esame visivo del giunto freddo non è molto diffusa nella pratica industriale: infatti, essa affida il rilevamento dei difetti della saldatura all'osservazione dell'operatore, che può avvalersi di alcuni strumenti di ingrandimento delle immagini. Essa presenta così caratteristiche svantaggiose rispetto ad altri tipi di controllo:

- è *incompleta* nel riconoscimento dei difetti della saldatura, poiché si limita al rilevamento di quelli affioranti o delle irregolarità di forma (incisioni marginali, eccesso di sovrametallo, ecc.), e solo se di dimensioni non microscopiche;

- i risultati dell'esame sono solo di tipo qualitativo, in quanto possono dare solo un'indicazione sull'entità più o meno importante del difetto senza fornire una misura precisa delle dimensioni (estensione e profondità): la valutazione di gravità è affidata al giudizio soggettivo dell'operatore.

A differenza che per altre tecniche (esame radiografico, a ultrasuoni), non esiste una normativa nazionale o internazionale che regoli la conduzione del controllo. Solamente le norme UNI EN 473 fanno riferimento alla qualifica dell'operatore; inoltre sono disponibili alcune norme generali, tratte dal regolamento sulle prove non distruttive del C.I.C.P.N.D.; infine, le raccomandazioni dell'associazione americana sugli esami non distruttivi (SNT-TC-1A).

Risulta che sono stati compiuti tentativi [14] di rendere automatico l'esame visivo grazie allo sviluppo delle tecniche di elaborazione al PC delle immagini acquisite da telecamere: in particolare, a questo scopo è stata applicata la tecnica di illuminazione con una striscia di luce laser per la misura di profili solidi [1]. Il pezzo saldato, dopo essere stato trasportato presso il laboratorio di controlli e misure, viene montato su un'attrezzatura che porta una testa mobile, che si sposta inseguendo la linea dell'asse della saldatura.

La testa è costituita da una sorgente di luce laser (diodo laser + lente cilindrica) e da un sensore CCD, che riprende l'immagine della striscia luminosa proiettata sul cordone. L'immagine viene successivamente acquisita da una scheda su PC, sul quale un software dedicato compie le misure di forma del profilo del giunto; risulta così possibile con successo il rilevamento e la misura di alcuni parametri di forma che definiscono le irregolarità, quali:

- altezza del sovrametallo (*reinforcement*);
- profondità del solco laterale alla saldatura (*undercut* o incisione marginale);
- larghezza del cordone (*width*);
- angolo alla base del cordone (*toe angle*);
- angolo tra le superficie dei pezzi saldati (*plate angle*);
- spostamento delle superficie dei pezzi saldati (*plate displacement*).

I valori limite ammissibili per questi parametri in un giunto saldato correttamente sono definiti dalle norme: quando la misura mostra che essi eccedono o difettano tali limiti, il software di elaborazione fornisce un segnale di allarme.

Non è però stata provata alcuna applicazione di questo metodo nel controllo on-line della saldatura: i tempi di esecuzione delle acquisizioni e delle elaborazioni non sarebbero abbastanza brevi (169 msec, contro i 40 msec richiesti nel controllo di processo, corrispondenti all'acquisizione di 25 frames/sec), ma potrebbero essere ridotti mediante l'uso di processori multipli; questa modifica potrebbe anche migliorare la precisione del sistema.

1.1.2- Esame visivo per il controllo di processo: controllo on-line

I metodi di analisi dell'immagine sono già ampiamente utilizzati nell'ambito dei processi di saldatura robotizzati per realizzare una parte del controllo della lavorazione, cioè l'inseguimento adattativo della linea della saldatura (questi sistemi prendono il nome di *inseguitori di giunto*) e la misura del riempimento del cianfrino¹; ad essi si fa un breve cenno in questo paragrafo.

Inoltre, lo sviluppo delle tecniche di visione artificiale ne ha suggerito l'impiego anche nel controllo on - line della correttezza della saldatura: tuttavia, finora i risultati di questa applicazione sono limitati all'ambito della ricerca e non esistono sistemi commerciali che realizzino questo *task*.

a) Impiego di tecniche di analisi di immagine negli inseguitori di giunto

Tutti questi sistemi si basano sull'uso di una striscia di luce laser proiettata sul cianfrino nella zona immediatamente precedente la torcia di saldatura (Figura 1.1). Il laser proietta una lama di luce che interseca la superficie investita in una linea, deformata secondo l'andamento di rilievi, depressioni e cambiamenti di pendenza della superficie stessa: riprendendone l'immagine e analizzandola si ricostruisce la forma tridimensionale dell'oggetto illuminato ([5], [6], [14]).

La linea laser proiettata sul cianfrino si deforma secondo una V, e attraverso la sua misura il sistema è in grado di:

- controllare la corretta preparazione dei pezzi da saldare: parametri geometrici del cianfrino, scostamento tra i lembi dei pezzi, ecc;
- localizzare l'asse del giunto per posizionare la torcia all'attacco della lavorazione;
- controllare la traiettoria programmata della torcia, correggendola in modo da seguire la linea dell'asse del cianfrino;
- nel caso di saldature multipassata e nelle passate di riempimento, misurare la quantità di metallo da depositare nel cianfrino per completare il cordone, sulla base del volume rimasto vuoto.

Esistono numerose applicazioni di questo metodo su robot di saldatura usati presso l'industria o disponibili in commercio ([3], [4], [7]); tuttavia dalla bibliografia risultano svolti molti studi per il miglioramento dell'efficienza della tecnica su cui si basano. Il riferimento a questi sistemi è interessante per l'analogia con le tecniche proposte per la misura del profilo del giunto tramite analisi dell'immagine della linea laser, allo scopo di riconoscerne i difetti o le irregolarità di forma.

¹ A proposito si trovano approfondimenti sullo stato di avanzamento della ricerca e sui sistemi commerciali nella bibliografia: cfr. [2], [15], [19], [22].

b) Studi sull'applicazione dell'analisi dell'immagine al controllo on – line della qualità del cordone di saldatura: riconoscimento di difetti già formati o in fase di formazione

Dallo studio della bibliografia risulta che alcuni gruppi di ricercatori (principalmente Kovacevic, Zhang et al. presso il Center for Robotics and Manufacturing Systems della University of Kentucky, e Lucas, Stone et al. presso il Department of Electrical and Electronic Engineering della Sheffield University) hanno svolto ricerche sulla possibilità di controllare il corretto andamento di un processo robotizzato di saldatura tramite l'analisi dell'immagine della regione di lavoro della torcia.

L'obiettivo principale dei sistemi sviluppati è il riconoscimento della buona penetrazione della saldatura, che è considerata la caratteristica fondamentale per la buona qualità e resistenza del giunto.

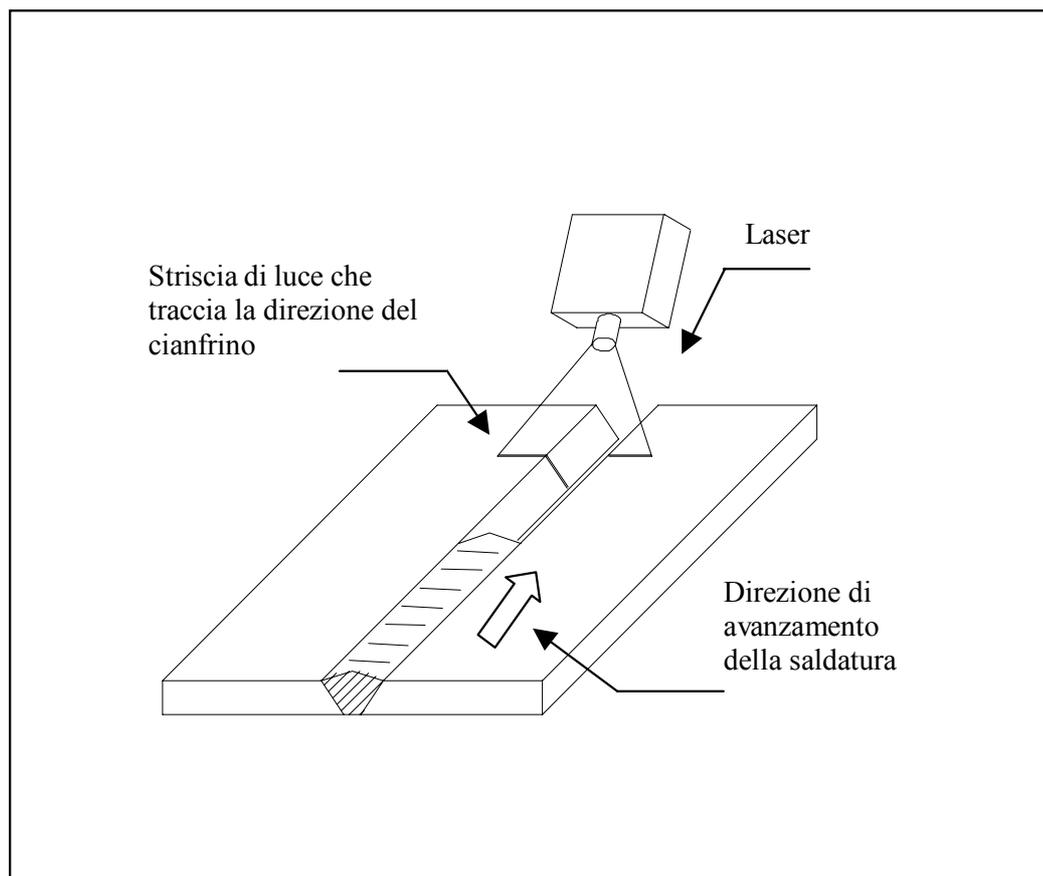


Figura 1.1: Schema di inseguitore di giunto con linea laser

I primi studi [9] hanno tentato il controllo di penetrazione osservando il rovescio della saldatura: la curvatura del cordone nella parte posteriore è significativa per comprendere se la saldatura è ben penetrata (Figura 1.2). Tuttavia le applicazioni non hanno avuto successo a causa della difficoltà di accesso alla zona da riprendere per l'attrezzatura che porta il sensore e i collegamenti all'unità di controllo: la telecamera veniva montata su una testa che si muoveva seguendo la traiettoria della torcia dalla parte opposta della saldatura. Il problema è rappresentato non solo dall'ingombro della telecamera (oggi esistono in commercio telecamere miniaturizzate), ma anche dall'esigenza di movimentare una testa diversa e indipendente rispetto all'end-effector del robot di saldatura in sincronismo con esso.

Nonostante la limitata capacità di controllo di questo sistema (incompletezza rispetto alle tipologie di difetto individuabili in un giunto, efficacia del controllo solo durante la passata di radice), esso presenta il vantaggio di non essere affatto disturbato dalle radiazioni emesse dall'arco elettrico. Questa caratteristica non è abbastanza favorevole, e il metodo non ha trovato successivi sviluppi.

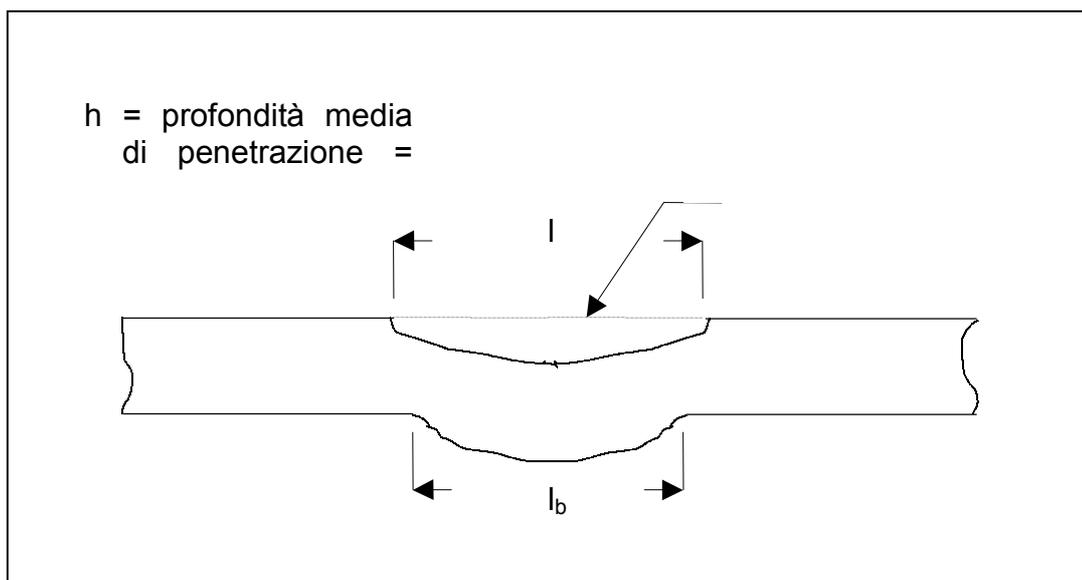


Figura 1.2: Sezione trasversale di una saldatura completamente penetrata: parametri geometrici

In alternativa, si è cercato un metodo per investigare il buon andamento del processo a partire dall'immagine della regione di saldatura ripresa dall'alto (schema di Figura 1.3). In questo caso, il sensore (telecamera) e gli eventuali sistemi di illuminazione possono essere montati all'end effector del robot insieme alla torcia, e facilmente vengono fatti muovere solidalmente con essa. Gli ingombri possono essere notevolmente ridotti usando telecamere miniaturizzate.

Gli studi su questa tecnica hanno avuto tutti lo scopo di verificare la completa penetrazione della saldatura attraverso due strade:

1. analisi dell'immagine della pozza ([5], [6], [11], [13]);
2. analisi dell'immagine del profilo del cordone ([2], [17]).

Il principio di funzionamento nei sistemi appartenenti ai due gruppi si basa, rispettivamente, sulla correlazione tra:

1. larghezza o area della pozza e completa penetrazione della saldatura;
2. concavità e larghezza del cordone e completa penetrazione della saldatura.

Architettura dei sistemi di controllo

Tutti questi sistemi usano attrezzature dello stesso tipo:

- una telecamera CCD in bianco e nero (sensore), sistemata in modo da riprendere la zona di interesse (pozza o profilo del giunto) dalla parte anteriore o posteriore, rispetto alla direzione di avanzamento della saldatura;
- un elaboratore (PC o multiprocessore) che acquisisce l'immagine della telecamera e la elabora mediante un software appositamente sviluppato.

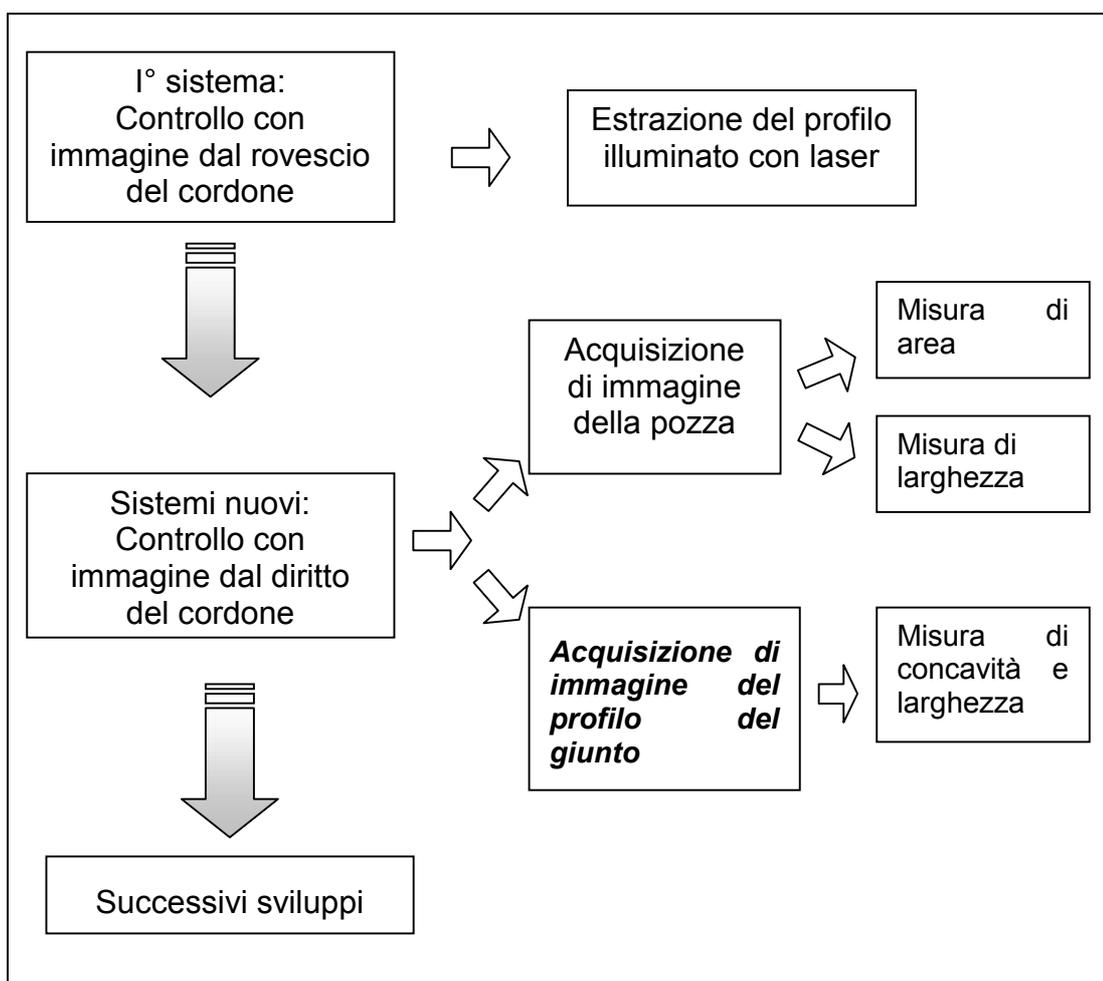


Figura 1.3: Schema dell'evoluzione della ricerca sui sistemi di controllo di completa penetrazione della saldatura

Solo in un caso [11], la telecamera è montata all'interno della torcia di saldatura e ad essa coassiale: si tratta di un sensore CCD miniaturizzato, che elimina i problemi di ingombro all'end-effector del robot. La sua posizione è tale da non vedere il bagliore dell'arco di saldatura, nascosto dall'elettrodo.

Sistemi di illuminazione utilizzati

Per quanto riguarda i sistemi di illuminazione, è necessario distinguere tra quelli impiegati per l'acquisizione delle immagini del cordone e della pozza: nell'acquisizione dell'immagine della pozza, le modalità di illuminazione sono diverse: si può ricorrere all'uso del laser come in [5], oppure avvalersi della luce prodotta dalla regione di saldatura (luce emessa dall'arco e riflessa dalla pozza, o emessa dal metallo fuso e incandescente), come in [6], [11], [13]. Nel primo caso, il laser è proiettato attraverso una griglia, che si disegna sulla superficie illuminata e risulta deformata in base all'andamento tridimensionale della superficie stessa: da questa immagine si estraggono le caratteristiche geometriche della pozza mediante un algoritmo un po' più complesso di quello usato per il profilo del giunto; in tutti gli studi basati sull'elaborazione di immagini del cordone, esso viene illuminato con una striscia di luce laser: il principio di funzionamento di questi sistemi di elaborazione di immagine è analogo a quello degli inseguitori di giunto con linea laser (si veda più indietro, in questo paragrafo).

Algoritmi usati: estrazione di feature dalle immagini e controllo dei parametri del processo

Anche per quanto riguarda gli algoritmi di elaborazione delle immagini è necessario distinguere tra i due casi di controllo sulla pozza o sul cordone: tutti i sistemi finora sviluppati eseguono l'estrazione del contorno della pozza. Ciò avviene basandosi sulle variazioni di luminosità nel passaggio dal metallo base al metallo fuso nelle immagini acquisite in [6], [11], [13]. In [5], studiando l'andamento tridimensionale della superficie del bagno: infatti, esso presenta una depressione in corrispondenza del centro, dove agisce la pressione dell'arco e aumenta di livello man mano che ci si sposta verso la periferia; infine, la variazione di pendenza termina quando viene raggiunta la superficie piana del metallo base.

Una volta noto il contorno della pozza, vengono misurate alcune grandezze geometriche: l'area (in [13]), la larghezza massima (in [6], [11]) o entrambe (in [5]). Esse costituiscono i parametri da controllare: empiricamente sono determinati i valori che devono assumere in una lavorazione corretta, e il controllo li mantiene costanti durante il processo aggiustando le variabili della saldatura (corrente, tensione, ecc.);

nei casi che prendono in esame l'immagine del cordone ([2], [17]), l'algoritmo misura la larghezza del giunto mediante i seguenti passi: binarizzazione della linea laser, estrazione dello 'scheletro', riconoscimento dei punti caratteristici del profilo (passaggio dal metallo base al cordone).

Prontezza dei sistemi di controllo: tempi di acquisizione ed elaborazione

Il tempo di ritardo dovuto all'acquisizione e all'elaborazione va da solo 50 msec nel sistema illustrato in [13], a 0,5 sec in quello di [2].

Disturbi dell'emissione dell'arco: metodi di eliminazione

Nei sistemi che utilizzano la linea laser per il riconoscimento del profilo ([2], [17]), l'eliminazione della luce emessa dall'arco è effettuata ponendo un filtro di fronte all'obiettivo della telecamera centrato sulla lunghezza d'onda emessa dal laser stesso: in questo modo si tagliano le radiazioni in tutto il rimanente intervallo di lunghezze d'onda di sensibilità del sensore CCD.

Nei sistemi che osservano la pozza i metodi usati sono molteplici:

- in due casi ([6], [13]), si sfrutta il carattere pulsato della corrente di saldatura e si acquisiscono le immagini durante l'intervallo (3 msec) di riduzione della corrente, a cui corrisponde una notevole attenuazione del bagliore dell'arco;
- nel sistema presentato in [5], la pozza è illuminata da una 'griglia' ottenuta con un laser stroboscopico: ovvero il laser emette impulsi luminosi di grande intensità, che sovrastano la luce dell'arco;
- nel caso del sistema coassiale, con la telecamera montata all'interno della torcia, il disturbo dell'arco è in gran parte eliminato perché coperto dall'elettrodo, che lo nasconde alla vista della telecamera; tuttavia, si ottiene un miglioramento del contrasto nelle immagini utilizzando un filtro del tipo RG 780.

Parametri del processo controllati

In tutti i sistemi illustrati, il parametro controllato è la corrente di saldatura (eventualmente il suo valore di picco, nel caso di saldature a corrente pulsata).

Considerazioni sull'uso dell'analisi di immagini per il controllo on – line della saldatura: confronto con altri metodi

Il metodo di esame visivo (elaborazione di immagini digitali) nell'applicazione al controllo on-line di saldatura risulta uno strumento dotato di grandi potenzialità, dal momento che risponde a molte delle esigenze di efficienza richieste:

- si tratta di un sistema non invasivo e ben integrabile nella regione di saldatura: il sensore CCD usato per le riprese non richiede il contatto con il pezzo e può essere disposto ad una certa distanza dalla zona inquadrata; dotandolo di una protezione meccanica adeguata, non risente dei disturbi dovuti alla temperatura elevata e alla proiezione di schizzi dalla pozza;
- l'unico disturbo fortemente presente nelle immagini è costituito dal bagliore dell'arco: tuttavia già sono stati esposti diversi metodi per la sua eliminazione o riduzione, che sono risultati efficaci; ancora è

possibile studiare la possibilità di un filtraggio efficiente della luce dell'arco, approfondendo la conoscenza del suo spettro di emissione;

- l'attrezzatura necessaria (telecamera ed eventuali sorgenti luminose) è molto semplice e poco costosa, rispetto a quelle richieste da altri sistemi: nel caso di controlli automatizzati con tecniche ad ultrasuoni, radiografiche, ecc., il sensore restituisce un'immagine che deve essere successivamente elaborata al PC; allora, il sistema di visione costituisce solo una parte di un'attrezzatura più complessa;
- i sistemi di visione artificiale consentono di abbreviare i tempi di ritardo del controllo fornendo una elevata velocità di calcolo (è stato mostrato che si può arrivare ad acquisire ed elaborare fino a 20 *frames/sec* [16], quando servono 4 *frames/sec* per un controllo efficiente;
- infine, è interessante osservare che questo metodo di esame della saldatura si avvicina molto al controllo realizzato direttamente dall'operatore durante lavorazioni manuali o semiautomatiche: come si vedrà più avanti, il saldatore esperto è in grado di verificare il buon andamento del processo e la correttezza del cordone prodotto sulla base dell'aspetto della pozza (dimensioni, luminosità, stabilità, ecc.) e del profilo del giunto (concavità, larghezza, ecc.).

1.1.3- Altri metodi di controllo on – line per il riconoscimento di difetti del cordone: stato di avanzamento della ricerca

Sono stati condotti altri studi sullo sviluppo di metodi di controllo on–line di correttezza della saldatura, tramite tecniche diverse dall'analisi di immagini della regione di saldatura. I risultati della ricerca bibliografica danno riferimenti riguardo ai seguenti, tutti orientati alla localizzazione e al controllo delle dimensioni e della forma della pozza di saldatura:

- tramite ultrasuoni;
- tramite analisi dello spettro infrarosso;
- tramite analisi del rumore dell'arco elettrico;
- tramite misure di semplici parametri, come temperatura, tensione d'arco e corrente.

Tutti questi sistemi si basano su modelli matematici di correlazione tra i parametri del processo e le caratteristiche geometrico-fisiche della pozza di saldatura.

1.1.4- Applicazione del controllo con ultrasuoni

Le tecniche di indagine con ultrasuoni possono essere usate per riconoscere e localizzare il confine della pozza saldatura, cioè il limite tra il metallo fuso e il metallo solido dei pezzi lavorati [23]. Infatti, è stato osservato che la velocità delle onde ultrasonore, nell'attraversamento del metallo, aumenta proporzionalmente con la temperatura: sulla base di modelli di

distribuzione di temperatura nella regione di saldatura, è possibile stabilire il punto di transizione dal bagno al metallo solido.

Il sistema presenta alcune difficoltà di applicazione, dovute ad errori derivanti da disturbi: i cambiamenti di struttura cristallina nella zona termicamente alterata influenzano il tempo di volo (traveling time) delle onde, producendo una misura sottostimata del diametro della pozza. Sono state compiute prove per la valutazione di un coefficiente correttivo per determinare il valore esatto delle dimensioni della pozza, nel caso di saldature su leghe di titanio, che hanno avuto successo: è stato realizzato un prototipo di sistema di misura in tempo reale.

L'applicazione di analisi delle immagini degli echi ultrasonori attraverso la pozza ha consentito il riconoscimento di alcune classi di difetti (mancanza di fusione, inclusioni, porosità e incisioni marginali) nel caso di passate di radice in saldature TIG di acciai al carbonio e inossidabili [24]; in questo caso i disturbi, derivanti dai gradienti di temperatura e dalla transizione di stato cristallino nella zona termicamente alterata, sono risultati di minore entità.

1.1.5- Applicazione di metodi di analisi dello spettro infrarosso

I metodi di analisi spettrale possono ricondursi a misure di temperatura della regione della pozza, compiute a partire dall'emissione di radiazioni magnetiche nel campo infrarosso da parte del metallo fuso o incandescente.

E' noto che i corpi emettono radiazioni infrarosse, a diversa lunghezza d'onda in base alla loro temperatura [25, 12]: acquisendo l'immagine della pozza con una telecamera sensibile nel campo IR si determina il gradiente termico nella regione di saldatura; il modello di emissione della pozza di saldatura è molto semplice, poiché essa può essere assimilata ad un corpo nero.

Confrontando le immagini IR ottenute con modelli termodinamici che prevedono l'andamento della temperatura nella regione di saldatura, si riesce a riconoscere la posizione e l'estensione del bagno, la cui conformazione dà informazioni sulla completa penetrazione del giunto (la mancanza di penetrazione rappresenta uno dei difetti di maggiore gravità in una saldatura). Tuttavia, questa è l'unica anomalia rilevabile con questo tipo di controllo; insieme, è possibile verificare il corretto posizionamento della pistola di saldatura sull'asse del giunto (verifica di simmetria della pozza)⁷.

Un aspetto interessante di questo metodo consiste nel limitare l'acquisizione di immagini al solo campo infrarosso, filtrando tutte le altre radiazioni che giungono al sensore, e quasi annullando il disturbo proveniente dall'arco elettrico. Si ottengono così immagini caratterizzate da un buon contrasto tra la pozza e l'arco (la lunghezza d'onda ottimale è $1,5 \mu m$, che è rilevabile solo con telecamere IR; le comuni telecamere usate per la visione artificiale hanno sensibilità anche nell'infrarosso, ma con sensibilità troppo piccola per lunghezze d'onda oltre $1,2 \mu m$).

E' evidente che l'interpretazione delle immagini provenienti dalla telecamera deve essere compiuta con gli strumenti (hardware e software) tipici della visione artificiale.

1.1.6- Applicazione dell'analisi del rumore dell'arco

La regione di saldatura e l'arco elettrico sono fonti di emissione di onde acustiche (20 Hz – 20 kHz): è stato osservato [26] che lo spettro acustico corrispondente a condizioni di saldatura ottimizzate è ben definito e diverso da quello fornito da saldature svolte in modo non corretto.

Conducendo prove con diverse combinazioni dei parametri e confrontando gli spettri ottenuti con quello corrispondente alle condizioni ottimali, si ottengono importanti informazioni diagnostiche riguardo alla forma della saldatura, alla profondità di penetrazione e alle caratteristiche della zona termicamente alterata. Non dà informazioni sugli altri difetti che possono crearsi in un cordone di saldatura.

Questo metodo richiede l'introduzione di un sensore nella regione di saldatura che sia quanto più prossimo possibile alle sorgenti di rumore (l'arco e, in minore quantità, la pozza), in modo da non essere disturbato da suoni provenienti dall'ambiente circostante.

1.1.7- Applicazione di misure di temperatura, tensione e corrente

Allo scopo di mantenere uniforme il livello di qualità dei giunti saldati, nonostante i disturbi, molti ricercatori hanno scelto di monitorare una proprietà fondamentale della regione di saldatura, come la dimensione della pozza; la metodologia di controllo consiste allora nel mantenere costante questa proprietà mediante la regolazione di alcuni parametri del processo, molto semplici da misurare.

Un tentativo [27] è stato compiuto tramite il mantenimento della temperatura di un punto della superficie della pozza ad un valore fissato, al quale corrisponde un corretto dimensionamento della pozza di saldatura. Questo metodo, però, ha mostrato una dipendenza troppo marcata dai disturbi: non risulta da solo in grado di mantenere un'estensione costante della pozza.

Per colmare questa deficienza, i ricercatori hanno proposto un metodo basato su logica fuzzy, che associa un indice di dimensione della pozza, formulato sulla base di misure di temperatura compiute in diversi punti della pozza: l'estensione desiderata della pozza è così mantenuta con successo in molteplici condizioni di saldatura.

Tuttavia, le dimensioni della pozza sono indicative solo della corretta penetrazione del giunto e non danno informazioni sulla presenza o sulla formazione di altri difetti.

Anche il valore della caduta di tensione agli estremi dell'arco elettrico fornisce informazioni sulla completa penetrazione: alcuni ricercatori [28] hanno provato un sensore di tensione sull'arco per la misura del grado di penetrazione di una saldatura TIG. E' stato dimostrato che il tasso di variazione della tensione è proporzionale a quello di sollevamento o abbassamento della superficie della pozza: la penetrazione completa si verifica quando la superficie della pozza scende, provocando un aumento della tensione d'arco. Ad ogni valore della tensione è stato possibile associare un valore di area del bagno.

1.3 Indice degli articoli

- [1]. G. Gatto, S. Cerini, *Che profilo!*, Automazione Oggi, Marzo 1998, pp. 214 – 217
- [2]. Y.M. Zhang, R. Kovacevic, *Real – time sensing of sag geometry during GTA welding*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, Maggio 1997, Vol. 119, pp. 151 – 160
- [3]. *Laser probe for weld tracking*, Meta Technology Ltd., 1997
- [4]. *Industrial Vision Processing, MetaTorch Adaptive Vision Guidance Systems*, RTR Rheinmetall TZN (Robot Vision), 1997
- [5]. R. Kovacevic, Y.M. Zhang, *Real – time image processing for monitoring of free weld pool surface*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, Maggio 1997, Vol. 119, pp. 161 – 169
- [6]. C.S. Wu, Y.C. Liu, *Rule – based control of weld bead width in pulsed gas tungsten arc welding (GTAW)*, Journal of Engineering Manufacture, Proc. Instn. Mech. Engrs., 1996, Vol. 210, pp. 93 – 98
- [7]. B. Marx, *Laser and electro – optic based sensors*, Sensor Review, 1996, Vol. 16, N°. 3, pp. 12 – 15
- [8]. J.S. Kim, Y.T. Son, H.S. Cho, K.I. Koh, *A robust visual seam tracking system for robotic arc welding*, Mechatronics, 1996, Vol. 6, N°. 2, pp. 141 – 163
- [9]. R. Kovacevic, Y.M. Zhang, *Role of welding parameters in determining the geometrical appearance of weld pool*, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1996, Ottobre, Vol. 118, pp. 589 – 596
- [10]. J. Lilley, A. McLay, *Improvement in weld inspection using time – of – flight diffraction techniques*, Welding and Metal Fabrication, Marzo 1995, N°. 5, pp. 25 – 29
- [11]. K.A. Pietrzak, S.M. Packer, *Vision – based weld pool width control*, Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME, Febbraio 1994, Vol. 116, pp. 86 – 92

- [12]. A. Bicknell, J.S. Smith, J. Lucas, *Infrared sensor for top face monitoring of weld pools*, Measurement, Science and Technology, IEE Proc., 1994, N°. 5, pp. 371 – 378
- [13]. D.A. Stone, J.S. Smith, J. Lucas, *Sensor for automated frontface weldbead area control*, Measurement, Science and Technology, IEE Proc., 1994, N°. 5, pp. 93 – 99
- [14]. R.A. White, J.S. Smith, J. Lucas, *Vision – based gauge for online weld profile metrology*, Science, Measurement and Technology, IEE Proc., Novembre 1994, Vol. 141, N°. 6, pp. 521 – 526
- [15]. Y. Li, J.E. Middle, *Machine vision analysis of welding region and its application to seam tracking in arc welding*, Journal of Engineering Manufacture, Proc. Instn. Mech. Engrs., 1993, Vol. 207, pp. 275 – 283
- [16]. N.D. Gustafson, *Competitive forces demand growth of application software for welding*, Welding Journal, Maggio 1993, N°. 5, pp. 43 – 46
- [17]. Y.M. Zhang, R. Kovacevic, L. Wu, *Closed – loop control of weld penetration using front – face vision sensing*, Journal of System and Control Engineering, Proc. Instn. Engrs., 1993, Vol. 207, pp. 27 – 34
- [18]. C.J. Murray, *Laser welder tracks seam automatically*, Design News, 1988, N°. 7, pp. 98 – 99
- [19]. R.J. Beattie, S.K. Cheng, P.S. Logue, *The use of vision sensors in multipass welding applications*, Welding Journal, Novembre 1988, N°. 10, pp. 28 – 33
- [20]. E.W. Kim, C. Allemand, T.W. Eagar, *Visible light emission during gas tungsten arc welding and its application to weld image improvement*, Welding Research Supplement, Dicembre 1987, pp. 369 – 377-s
- [21]. J.E. Agapakis, J.M. Katz, M. Koifman, G.N. Epstein, J.M. Friedman, D.O. Eyring, H.J. Rutishauser, *Joint tracking and adaptive robotic welding using vision sensing of the weld joint geometry*, Welding Journal, Novembre 1986, N°. 10, pp. 33 – 41
- [22]. W. Lucas, *IT in welding and cutting for the welding engineer – Pc programs and the Internet*

- [23] W. Young, R. Fenn, B. Ralph, *Temperature model for ultrasonic measurement of titanium welds*, Transactions of Hong Kong Institution of Engineers, Marzo 1996, Vol. 2, N° 3, pp. 33 – 37
- T.F. Bastos, L. Calderòn, J.M. Martin, R. Ceres, *Ultrasonic sensors and arc welding – a noisy mix*, Sensor Review, 1996, Vol. 16, N° 3, pp. 26 – 32
- [24] I. Stares, C. Duffill, et al., *On – line weld pool monitoring and defect detection using ultrasonics*, NDT International, Agosto 1990, Vol. 23, N° 4, pp. 195 – 200
- [25] Altri riferimenti bibliografici riguardanti studi sulle immagini IR della pozza di saldatura sono:
- C. Doumanidis, *Hybrid modeling for control of weld pool dimensions*, Proc. 92 Jpn. USA Symp. Flexible Autom., 1992, ASME, New York, pp. 317 – 323
- G. Gao, *Infrared sensor for weld seam tracing and penetrating depth control*, Infrared, Febbraio 1992, N° 2, pp. 39 – 42, 6
- S. Nagarajan, W. Chen, P. Banerjee, B. Chin, *Control of the welding process using infrared sensors*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Febbraio 1996, Vol. 8, N° 1, pp. 86 – 93
- J. Doong, C. Wu, J. Hwang, *Infrared temperature sensing of laser welding*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1991, Vol. 31, N° 4, pp. 607 – 616
- M. Balle, *Automated IR-weld seam control*, Proceedings of the SPIE – The International Society for optical Engineering, 1990, Vol. 1313, pp. 332 - 339
- [26] H. Gu, W.Duley, *Statistical approach to acoustic monitoring of laser welding*, Journal of Physics, D: Applied Physics, Marzo 1996, Vol. 29, N° 3, pp. 556 – 560
- [27] Y. Won, H. Cho, *Fuzzy predictive approach to the control of weld pool size in gas metal arc welding processes*, Manufacturing Science and Engineering, ASME, 1993, Vol. 64, pp. 927 – 928
- [28] A. Bicknell, J.S. Smith, J. Lucas, *Arc voltage sensor for monitoring of penetration in TIG welds*, IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, Novembre 1994, Vol. 141, 6, pp. 513 – 52

1.4 Conclusioni sullo stato dell'arte

Nell'analisi bibliografica sono stati reperiti alcuni sistemi sviluppati da gruppi di ricercatori per il controllo di un processo di saldatura robotizzata applicando l'elaborazione di immagini digitali. Le potenzialità di questo metodo sono:

- facile adattabilità del sistema ad integrarsi nell'ambiente aggressivo della saldatura;
- influenza limitata dei disturbi: l'unico disturbo grave è il bagliore dell'arco;
- semplicità dell'attrezzatura necessaria;
- prontezza del sistema (elevata velocità nell'acquisizione e nell'elaborazione delle immagini);
- analogia con il controllo visivo diretto effettuato dall'operatore durante i processi di saldatura manuali o semiautomatici.

Tuttavia, i sistemi sviluppati finora non danno risposta ad alcuni problemi di rilevante importanza, quali:

1. risoluzione dell'*incompletezza* del controllo: tutti i metodi studiati finora hanno avuto come scopo il solo controllo della completa penetrazione della saldatura; nonostante essa rappresenti la caratteristica di maggior rilievo per l'integrità del giunto, esistono altre tipologie di difetti gravi che possono aver luogo durante la lavorazione e che inficiano la qualità della saldatura;
2. sviluppo di un controllo adattativo che agisca su tutte le variabili regolabili del processo (variabili elettriche: corrente, tensione; variabili meccaniche e geometriche: velocità di avanzamento, stick out, stick off): finora i sistemi descritti realizzano solo il controllo di corrente;
3. eliminazione del disturbo dell'arco in ogni condizione di saldatura: finora questo problema è stato risolto o ricorrendo in situazioni particolari di lavorazione (saldatura a corrente pulsata, con acquisizione delle immagini durante lo 'spegnimento' dell'arco) o

nascondendo l'arco alla vista del sensore (caso della telecamera coassiale con la torcia).

Lo scopo di questo lavoro è di proporre metodi di acquisizione ed elaborazione di immagini di saldatura che possano risolvere i problemi sopra esposti; la metodologia proposta prevede:

1. il tentativo di risolvere l'*incompletezza* del sistema integrando l'analisi di più immagini riprese da diverse zone della lavorazione, e significative per la descrizione dell'andamento del processo ;
2. lo studio per una correlazione globale tra tutti i parametri regolabili del processo e la formazione di difetti. Questo problema presenta due aspetti interessanti: la conoscenza della correlazione stessa e la scelta della combinazione di variazioni dei parametri per le decisioni del controllo durante il processo; il primo passo è stato affrontato tramite la ricerca bibliografica e attraverso le interviste ai tecnici saldatori specializzati;
3. infine, un'analisi dello spettro di emissione dell'arco elettrico per la scelta di un metodo efficace di filtraggio del disturbo prodotto dall'arco: le ipotesi sviluppate hanno trovato conferma in una serie di prove per la scelta dei filtri.

2- Hardware per l'acquisizione: immagini e problematiche

La scelta dei metodi di controllo da usare comporta la definizione del tipo di immagine da acquisire, da cui dipende l'architettura del sistema di visione. Nel corso della fase 2.3 della linea 5 del progetto SPI, le considerazioni sui difetti visibili di saldatura e sulla loro correlazione con l'aspetto delle componenti della zona di saldatura hanno portato alla scelta delle seguenti viste:

1. **vista dall'alto del bagno** o pozza di saldatura;
2. **vista del giunto appena formato** o già freddo illuminato con luce strutturata (linea di luce laser nel visibile) ;

2.1- Immagine della pozza e del cordone di saldatura: caratteristiche geometriche e di luminosità

Concordemente con quanto sopra detto, l'idea adottata nell'ambito del progetto e realizzata a livello di prototipo dall'RTM, è stata quella di utilizzare un'attrezzatura montata all'end-effector del robot, costituita da due telecamere: esse riprendono, rispettivamente, la pozza e una linea di luce laser proiettata poco più indietro, sul cordone già formato.

Tuttavia, le informazioni ricavate dalla pozza riguardano difetti in via di formazione: ciò permette l'intervento immediato del controllo, con il solo ritardo dovuto ai suoi tempi d'azione, che sono stati valutati in 250 msec, contro i 2000 msec del tempo caratteristico di evoluzione dei fenomeni del processo.

Al contrario le informazioni derivanti dal cordone riguardano una regione che già dista qualche centimetro dalla pozza di saldatura; nell'istante in cui si individua un difetto, già il tratto di cordone, dal laser verso la pozza, è interessato dallo stesso difetto: dunque, al ritardo del controllo deve essere sommato il tempo relativo alla creazione di questa porzione di cordone.

Perché il controllo possa considerarsi efficace, è necessario che la somma di questi tempi non superi $(2 \times 250) \text{ msec} = 500 \text{ msec}$. Ciò corrisponde a limitare la massima distanza della linea laser dal confine della pozza a **20-30 mm** per una velocità di saldatura variabile tra **60 e 80 cm/min**. Poiché la metodologia di saldatura cui facciamo riferimento (si veda il Capitolo 3 'Tipologia di saldatura e suoi difetti tipici: il caso Ansaldo') prevede velocità di avanzamento più basse (180-250 mm/min), la distanza massima che ancora garantisce l'efficiente funzionamento del sistema risulta un valore cautelativo.

Le caratteristiche delle immagini che si vogliono ottenere sono illustrate qui nel seguito, separatamente per la pozza e per la linea del profilo, con un'indicazione delle modalità di acquisizione:

1. l'immagine della pozza, che si prevede di acquisire, presenta una regione più luminosa, corrispondente al metallo fuso, contro uno sfondo scuro corrispondente al metallo di base dei pezzi da saldare; risulta utile la ripresa in monocromatico (cioè con telecamera in bianco e nero). L'aspettativa è che il livello di grigio delle due zone dell'immagine sia fortemente diverso (come appare la pozza alla vista dei saldatori) e che i contorni della pozza siano ni-

tidi e ben delineati: ciò consente la separazione delle due regioni dell'immagine in bianco e nero tramite una semplice operazione di binarizzazione. Per ottenere questo, è necessario:

- a) eliminare il disturbo della luce dell'arco: poiché nella ripresa della zona del bagno l'arco è direttamente inquadrato, in essa si risentirà maggiormente di questo problema; a questo scopo, si richiede un sistema di filtraggio luminoso (combinazione di due o più filtri) che lasci passare le radiazioni emesse dal metallo fuso e non quelle dell'arco. Filtrando la luce dell'arco si elimina anche il problema della luce riflessa dal metallo base: i riflessi dell'arco sul metallo tenderebbero ad allargare la regione luminosa, nascondendo lo stacco netto al confine della pozza.
 - b) studiare il valore ottimale dell'ingrandimento e quindi realizzare la scelta dell'obiettivo da usare nella ripresa delle immagini, in modo da avere la risoluzione necessaria per il facile riconoscimento dei contorni: la risoluzione delle immagini che il sistema a disposizione (telecamera Pulnix + scheda Matrox) consente è di 580x756 pixel; è necessario procedere per tentativi con diversi tipi di obiettivo per ottenere le immagini;
2. l'immagine della linea laser è molto più semplice da acquisire e di caratteristiche più facilmente definibili: del resto, l'esperienza di applicazioni industriali di questo metodo di illuminazione a scopi di misura è ormai piuttosto diffusa. L'unico problema che si presenta in questo caso è costituito dal disturbo della luce dell'arco, che sovrasta certamente quella del laser: i laser usati per queste applicazioni sono di piccola potenza e la loro capacità di illuminazione è molto limitata. Tuttavia, la soluzione adottabile è molto semplice: infatti, il laser è una sorgente di luce monocromatica, ovvero emette secondo una lunghezza d'onda, λ , ben definita. E' sufficiente scegliere il laser in modo che λ cada in un intervallo di bassa emissione dell'arco, e montare all'obiettivo della telecamera un filtro passabanda, a banda stretta, centrato sulla lunghezza d'onda del laser.

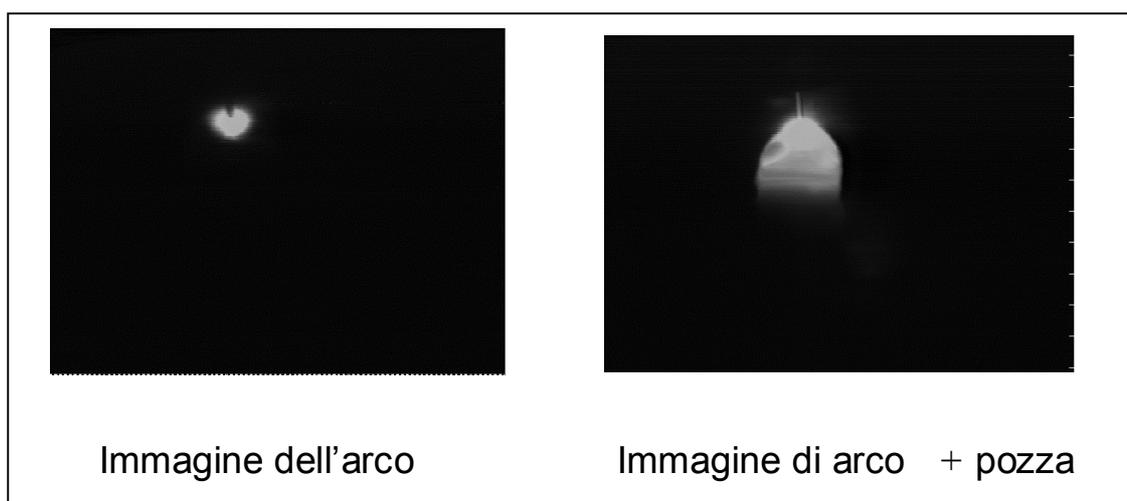


Figura 2.1: Esempi di immagini della regione di saldatura ottenute con diversi sistemi di filtraggio, che consentono di separare la pozza dall'arco di saldatura

In Figura 2.1 sono riportate due immagini ottenute con due filtraggi diversi in modo da oscurare, nel primo caso, con un filtro infrarosso, la pozza incandescente. Acquisendo contemporaneamente le due immagini si potrebbe operare successivamente una sottrazione e isolare le due componenti, il bagno e la pozza, per operare un'analisi più accurata delle rispettive dimensioni. Tuttavia questa complicazione dell'hardware non risulta giustificata ed è evitabile ricorrendo agli algoritmi testati e descritti nel capitolo relativo.

2.2- Eliminazione del disturbo derivante dall'emissione dell'arco elettrico: analisi dello spettro di emissione e scelta dei filtri

E' noto che la regione di saldatura è un ambiente che emette un elevato contenuto di radiazioni in un ampio intervallo di lunghezze d'onda, dal campo infrarosso fino all'ultravioletto: esse possono produrre disturbi nell'acquisizione delle immagini della pozza e del cordone, durante la lavorazione.

La fonte più importante di disturbo è costituita dall'emissione dell'arco, che per la sua elevata intensità copre completamente ogni altro segnale luminoso.

2.2.1- Caratteristiche di emissione dell'arco elettrico di saldatura

L'arco elettrico emette radiazioni in uno spettro pressoché continuo, a partire dal vicino infrarosso fino all'ultravioletto. Inoltre esso copre in parte la regione della pozza di saldatura e i suoi riflessi si osservano sulla superficie dei pezzi da saldare.

Durante le acquisizioni, risulta perciò impossibile separare completamente l'immagine dell'arco rispetto a quella degli altri elementi della regione di saldatura, sia spazialmente che in frequenza.

Tuttavia alcuni studi spettroscopici (si veda il Capitolo 1 sulla bibliografia, [15] e [20] nell'elenco degli articoli) hanno messo in evidenza che il maggior contenuto di radiazioni dell'arco è concentrato in intervalli limitati di lunghezze d'onda: lo spettro presenta infatti dei picchi, di intensità molto più grande del rumore *bianco* di fondo. Essi corrispondono all'emissione degli atomi ionizzati del gas di protezione usato durante la lavorazione (miscele di Ar o He) e degli ioni del metallo saldato, che vaporizzano dal bagno di saldatura. Ne segue che la forma dello spettro cambia fortemente in funzione delle variabili del processo (materiale da saldare, gas di protezione).

Gli studi illustrano anche gli effetti della variazione dei parametri di saldatura sull'emissione dell'arco: solo la corrente di saldatura influenza la forma dello spettro, provocandone una leggera traslazione verso intervalli di lunghezze d'onda maggiori e aumentando l'intensità di emissione, sia del rumore *bianco* che dei picchi.

In tutti i casi è possibile individuare alcune finestre dello spettro libere entro le quali è più agevole l'acquisizione delle immagini della zona di saldatura, essendo molto ridotto il disturbo dell'arco; si riportano gli intervalli di lunghezze d'onda corrispondenti:

- 5790 – 5870 Å;

- 5890 – 6010 Å;
- 6440 – 6630 Å.

Questi risultati sono utilizzati per la scelta dei metodi di ripresa delle immagini della pozza e del cordone di saldatura.

2.2.2- Scelta dei filtri per l'acquisizione delle immagini della pozza

Per acquisire le immagini della pozza di saldatura è necessario ridurre l'intervallo di lunghezze d'onda in cui la telecamera è sensibile, utilizzando un'opportuna combinazione di filtri ottici, colorati o interferenziali.

L'intervallo di nostro interesse dovrebbe corrispondere ad una porzione della regione di massima emissione del metallo fuso della pozza, che sia anche una finestra libera nello spettro di emissione dell'arco.

Il bagno di metallo fuso emette principalmente nella regione di grandi lunghezze d'onda dello spettro visibile e nel vicino infrarosso. Alcuni studi calcolano la lunghezza d'onda di massima emissione della pozza, assimilandola ad un corpo nero; in base alla legge di Wein:

$$\lambda_m \cdot T = 2411 \mu m \cdot K = \text{cost.}$$

alla temperatura del metallo fuso: $T = 1800 K$, si ha:

$$\lambda_m = 1,6 \mu m.$$

Un'altra considerazione da tener presente è la risoluzione necessaria al sistema di visione per riprendere l'immagine del bagno: è opportuno che l'intervallo di acquisizione cada sulla lunghezza d'onda di massima emissività differenziale, cioè quella per cui si ha il maggior cambiamento dell'intensità delle radiazioni emesse al variare della temperatura del processo. Esprimendo l'emittanza della pozza come quella di un corpo nero, si ha:

$$L_b(\lambda, T) = \left(\frac{c_1}{\pi} \right) \cdot \lambda^{-5} \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)^{-1}$$

da cui, derivando rispetto alla temperatura T , uguagliando a zero, si ha:

$$\lambda_m^I = 1.34 \mu m.$$

Sarebbe ragionevole scegliere per le acquisizioni un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 1,34 e 1,6 μm .

Tuttavia la sensibilità della telecamera, che è ancora buona nel vicino infrarosso, decresce nel campo di lunghezze d'onda ancora più grandi.

In conclusione si sceglie di acquisire in una regione dello spettro compresa tra il campo visibile (giallo – rosso) e il vicino infrarosso.

In seguito a diverse prove di acquisizione di immagini di saldatura con varie combinazioni di filtri, era stato individuata una possibilità di filtraggio con buona riduzione della luce dell'arco mediante l'uso di una combinazione di due filtri: RG780+filtro Neutral Density 10%. La validità di questo risultato è stata confermata dall'uso di un filtro RG780 nella ripresa dell'immagine della pozza nel sensore RTM (si veda il paragrafo 2.3- *Hardware per acquisizione immagini realizzato da RTM*).

2.3- Hardware per acquisizione immagini realizzato da RTM

L'hardware per l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini sviluppato da RTM è costituito da due parti fondamentali:

1. il sensore per la ripresa delle immagini, che viene montato sul robot di saldatura;
2. un PC industriale su cui è installata una scheda di acquisizione e un software dedicato alla memorizzazione e all'elaborazione delle immagini.

Il sensore è realizzato mediante l'accoppiamento di due moduli, rispettivamente per la ripresa delle immagini della pozza e del profilo del cordone di saldatura. Il primo è costituito da una telecamera al cui obiettivo è montato un filtro RG 780, che riduce il disturbo dell'arco elettrico (si veda il paragrafo precedente 2.2.2- *Scelta dei filtri per l'acquisizione delle immagini della pozza*) permettendo di separare la pozza dallo sfondo (si veda Figura 2.2).

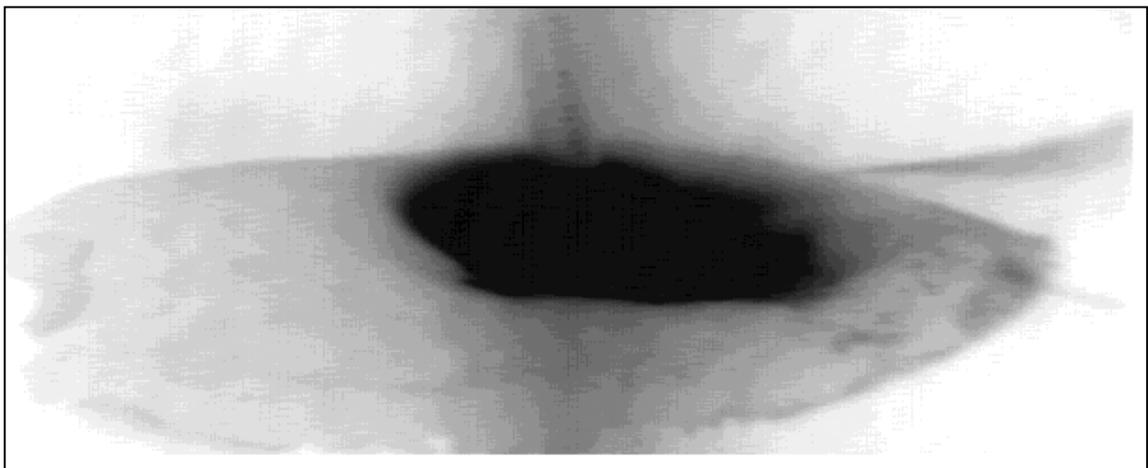


Figura 2.2: Immagine della pozza di saldatura acquisita con il sensore RTM (immagine a colori invertiti)

Il secondo modulo è formato da:

- un diodo laser di potenza pari a 50 *mW* che emette ad una lunghezza d'onda $\lambda = 780 \text{ nm}$, la cui luce attraversa una lente cilindrica e viene proiettata in forma di striscia luminosa sul cordone appena formato. Sul cordone la *linea laser* si deforma secondo la forma tridimensionale del cordone stesso, disegnandone il profilo. Nella configurazione iniziale, durante la prima serie di prove (si veda il paragrafo 3.3.1- *Prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 15/07/1999)*), sul sensore RTM era montato un diodo laser di potenza ridotta (25 *mW*);
- una telecamera identica a quella usata per la ripresa delle immagini della pozza, sul cui obiettivo è montato un filtro passabanda a banda stretta centrato sulla lunghezza d'onda del laser.

Data la vicinanza del sensore alla regione di saldatura, le condizioni di lavoro sono elevata temperatura e presenza di particelle incandescenti proiettate dalla pozza (spruzzi). Perciò i due moduli sono racchiusi da una scatola metallica di protezione, che è anche il supporto attraverso il quale il sensore viene fissato all'end effector del robot di saldatura; all'interno è disposto il sistema di raffreddamento ad acqua.

Le dimensioni del sensore CCD delle due telecamere è di 600x250 pixel, che corrispondono alla risoluzione delle immagini. La frequenza di acquisizione è di 8 *frames/sec* (0,25 *sec* il tempo per acquisizione e salvataggio su disco per ogni immagine), in modalità non interlacciata. In Figura 2.3 è riportata una immagine che rappresenta la linea laser del profilo.

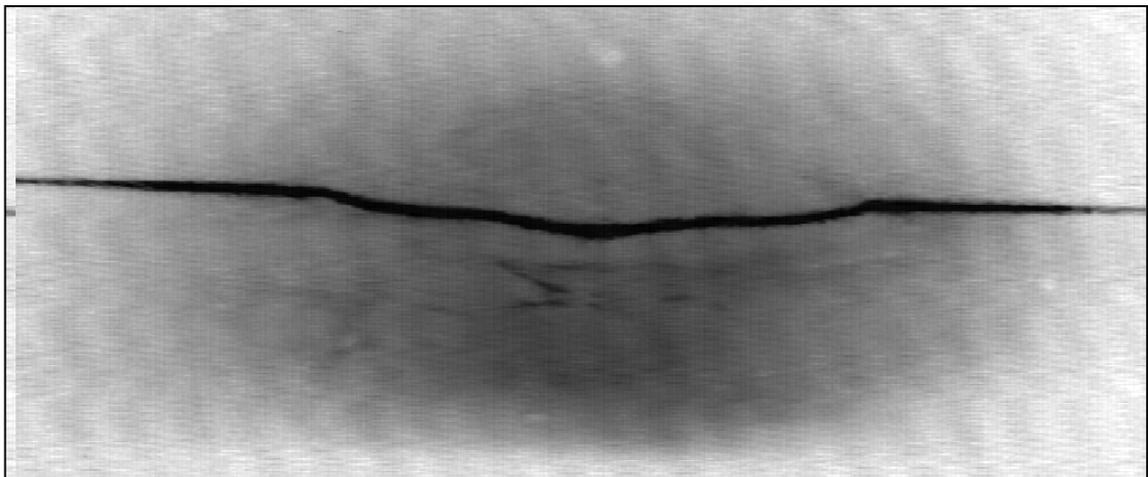


Figura 2.3: Immagine della linea laser ottenuta con il sensore RTM (immagine a colori invertiti); a causa della modalità di montaggio del sensore, l'immagine della profilo laser appare ribaltata

I dati provenienti dalle telecamere del sensore sono acquisiti mediante una scheda National installata su un PC industriale e gestita mediante un software appositamente sviluppato: il software è in grado di registrare, memorizzare su disco e mostrare le immagini acquisite.

Il formato usato per la memorizzazione delle immagini su disco è **.cam* o *Casio Camera Format*. Le informazioni necessarie, per l'apertura e la lettura dei file di questo formato, sono state fornite da RTM. Al termine di una sequenza di saldatura si ottengono normalmente due file **.cam*, uno per le immagini della pozza e uno per le immagini del cordone (per esempio, 'hot.cam' e 'cold.cam'):

ciascun file è costituito dalla raccolta di più frame, cioè corrisponde ad un filmato digitale della saldatura stessa. Ciò non toglie la possibilità di salvare ciascuna immagine separatamente durante la sequenza e sempre nello stesso formato (per esempio, in due cartelle separate per le immagini della pozza e del cordone, la serie: '0001.cam',..., '0100.cam',...,).

Le immagini disponibili nel formato *.cam possono essere convertite in sequenze di immagini in formato standard *bitmap* o *tif* mediante un apposito software ('*Convertitore CAM to BMP*') fornito da RTM. Insieme ad esso, il software '*DigitalVCR*' è stato fornito per la visualizzazione delle sequenze di immagini in formato .cam.

2.4- Hardware per l'acquisizione delle immagini realizzato da Qualital

L'hardware per l'acquisizione ed il salvataggio delle immagini di saldatura realizzato dal Qualital è costituito da:

1. scheda di acquisizione Matrox Meteor II MC (Multi Channel), installata su PC con processore Pentium II;
2. telecamera CV-M50, in bianco e nero, con uno zoom M6Z 1212 (12.5 –75 mm, F1,2) e un filtro RG 780 montato di fronte all'obiettivo durante la ripresa della pozza di saldatura;
3. un laser He-Ne che emette nel visibile (rosso) di potenza pari a 5 mW, con lente cilindrica.

La scheda di acquisizione scelta ha disponibili le seguenti funzioni e caratteristiche quali:

- portabilità del software tra i vari modelli Matrox, per applicazioni che richiedono prestazioni superiori;
- controlli VBX, OCX, DLL e DDE.

Il modello prescelto, Meteor II, rappresenta il migliore compromesso in termini di prestazioni rispetto al costo di acquisto. La versione MC (Multichannel) è inoltre l'ultima uscita sul mercato per cui risultano disponibili continui aggiornamenti del software anche per le ultime versioni dei sistemi operativi (Windows NT, 95 e 98).

E' inoltre possibile l'acquisizione di immagini direttamente da telecamere digitali, qualora se ne preveda l'impiego in fasi successive del progetto.

E' infine possibile sfruttare l'ingresso delle bande a colori per l'acquisizione da diversi canali, e controllare il sincronismo in modo da avere contemporaneamente informazioni sull'immagine della parte calda e di quella fredda.

Il sensore costituito dalla combinazione di filtro, telecamera e laser è stato utilizzato per la ripresa di alcune sequenze di saldatura presso lo stabilimento di Ansaldo Energia a Legnano (si veda il paragrafo 3.3.1- *Prove di saldatura con sensore Qualital (Legnano – 20/09/1999)*): le immagini, anche se diverse da quelle ottenute con il sensore RTM (che farà parte del sistema dimostratore finale), sono state utili per lo sviluppo del software di elaborazione e riconoscimento dei difetti (si veda il Capitolo 4 sul software e il Capitolo 6 sugli algoritmi).

Le immagini acquisite dal sensore Qualital presentano una diversa risoluzione: le dimensioni della matrice CCD sono 768x576, tuttavia la risoluzione delle

immagini è dimezzata poiché l'acquisizione avviene in modalità non interlacciata (risoluzione = 768x288; si veda il paragrafo 2.5, successivo). La frequenza di acquisizione oscilla tra 6 e 7 Hz; per la ripresa della pozza l'otturatore della telecamera viene impostato ad una frequenza di 10.000 Hz.

L'acquisizione ed il salvataggio delle immagini vengono gestiti mediante il software 'Ivision' appositamente sviluppato: in esso, oltre ai moduli che svolgono le due operazioni suddette, sono integrati tutti gli algoritmi di elaborazione delle immagini e controllo dei difetti. Per la descrizione dell'architettura del programma si vedano i Capitoli 4 sul software, 5 e 6 sugli algoritmi e 7 sulla strategia del controllo.

Per ogni sequenza di saldatura, il software sviluppato è in grado di acquisire e salvare su disco due sequenze di immagini, una per la pozza (*hot*) e una per il cordone (*cold*), in formato standard *tif* o *bmp*. I moduli di programma dedicati alla lettura e al salvataggio delle immagini sono in grado di manipolare anche filmati digitali o immagini in formato **.cam*, come quelli forniti dalla scheda del sistema RTM (si veda il paragrafo 2.6 sulla comunicazione tra i due sistemi RTM e Qualital).

Seguono due immagini che rappresentano l'aspetto della pozza e del profilo laser ottenute mediante il sensore Qualital (figure 2.4 e 2.5).

2.5- Modalità di acquisizione: frequenza di acquisizione e opzione *non interlacciato*

La frequenza di acquisizione del sistema è di circa 8 Hz (tempo di acquisizione di 0,25 sec) per il sensore RTM (si veda il paragrafo 2.3- *Hardware per acquisizione immagini realizzato da RTM*). Un aumento di tale frequenza non migliora la quantità di informazioni, tenuto conto di:

- variabilità tra un'immagine e l'altra;
- evoluzione dei fenomeni più lenta, dell'ordine di qualche secondo.

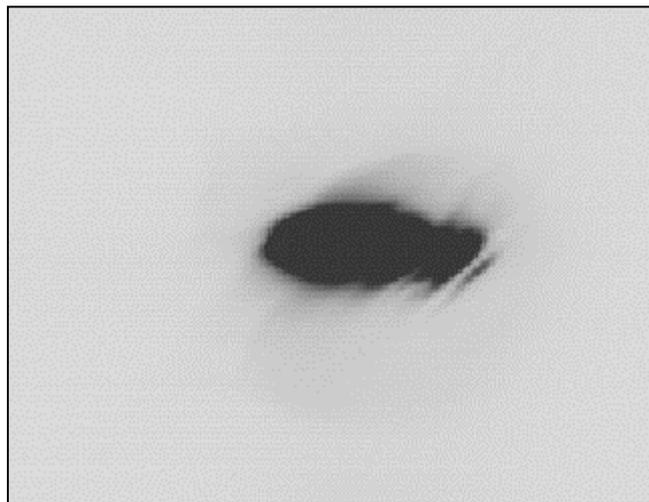


Figura 2.4: Immagine della pozza di saldatura ottenuta con il sensore Qualital (immagine a colori invertiti)



Figura 2.5: Immagine della linea laser proiettata sul giunto saldato, ottenuta con il sensore Qualital (immagine a colori invertiti)

Viceversa sarebbe necessario un otturatore a frequenza più elevata di 10.000 Hz per avere immagini più statiche, ma valori più elevati non sono disponibili in telecamere commerciali di basso costo, richieste per il sistema.

Per quanto riguarda l'analisi del freddo, una scansione corretta richiede che tra immagini consecutive vi sia parziale sovrapposizione della lama laser: in questo modo la striscia di luce laser compie una ricopertura completa del cordone. Naturalmente i parametri da cui dipende il verificarsi di questa condizione sono la frequenza di acquisizione e la velocità di avanzamento di saldatura.

Nelle acquisizioni off-line delle immagini del cordone, realizzate con il sensore Qualital, è possibile ottenere virtualmente tale effetto e ridurre la velocità di avanzamento del robot a saldatura spenta. Viceversa, nel sistema on-line (sensore RTM) è necessario incrementare la frequenza di acquisizione in funzione della velocità di traslazione della torcia. Esempio di calcolo: considerando che la frequenza di acquisizione e salvataggio è di 8 Hz e che la lama laser misura circa 1 mm di spessore, lo spostamento deve essere di $1 \cdot 8 = 8 \text{ mm/sec} = 480 \text{ mm/min}$. La condizione di ricoprimento è rispettata poiché l'intervallo di variabilità della velocità di avanzamento caratteristica della tipologia di saldatura considerata è 180-250 mm/sec (si veda il paragrafo 3.1- *Tipologia di saldatura svolta da Ansaldo Energia e difetti tipici*).

La ripresa delle immagini della pozza di saldatura presenta la difficoltà della loro forte variabilità: per esempio istanti della sequenza caratterizzati da spegnimenti totali o parziali dell'arco, che diminuiscono fortemente la luminosità delle immagini, seguiti dal ristabilimento di dimensioni normali dell'arco o addirittura da fiammate o fumo, che aumentano la zona luminosa all'interno dell'immagine. L'acquisizione nella modalità interlacciata (modalità standard di funzionamento della scheda che consiste nella scansione delle righe del sensore CCD, pari e dispari in modo alternato) comporta normalmente la sovrapposizione di due 'istantanee' della pozza con condizioni di luminosità

molto diverse: l'effetto è una caratteristica rigatura orizzontale delle immagini stesse.

Il problema viene eliminato modificando la modalità standard e passando a quella non interlacciata, usata sia dal sensore RTM che da quello Qualital: ciò comporta il dimezzamento della dimensione verticale dell'immagine, ma una maggiore stabilità delle condizioni di luminosità.

2.6- Comunicazione tra hardware RTM e hardware Qualital

Lo sviluppo di due diversi sistemi di acquisizione ed elaborazione delle immagini (RTM e Qualital) richiede la creazione di un metodo di scambio di dati per consentire l'integrazione in un unico modulo finale, il dimostratore del sistema di controllo di saldatura: esso sarà costituito dal sistema di acquisizione RTM (sensore e scheda su PC industriale; si veda il paragrafo 2.3- *Hardware per acquisizione immagini realizzato da RTM*) e dal sistema di elaborazione e controllo Qualital (PC + scheda Matrox + software *Ivision – On line welding control*; si veda il paragrafo 2.4- *Hardware per l'acquisizione delle immagini realizzato da Qualital*). La necessità di tenere separati i due sistemi deriva:

- dall'appesantimento che provocherebbe l'installazione del programma di controllo sul PC RTM, che ha prestazioni limitate essendo un PC industriale: in questo caso la separazione garantisce maggiori velocità di elaborazione;
- dalla facilità di sviluppare i due sistemi autonomamente in ambienti di programmazione diversi (*Visual Basic* per il sistema Qualital; *C* per quello RTM).

La comunicazione tra i due moduli deve consistere nel passaggio di dati-immagini acquisiti dal modulo RTM al modulo di analisi Qualital: le possibili modalità di comunicazione sono state oggetto di un esame di fattibilità e convenienza da parte sia di RTM che di Qualital. Le due vie inizialmente proposte sono state le seguenti:

1. comunicazione di dati secondo protocollo TCP/IP, suggerito da RTM: in questo caso, i dati-immagini possono essere trasferiti direttamente sotto forma di matrici al programma di elaborazione, che può eseguire il salvataggio su disco sotto forma di file in diversi formati (si veda il Capitolo 4. *Software di controllo*) contemporaneamente all'analisi di correttezza della saldatura;
2. salvataggio diretto su hard disk del PC Qualital condiviso mediante collegamento in rete. Tale metodo, in base ai test effettuati, dovrebbe avere ritardi e consentire una frequenza di acquisizione accettabili.

Altre possibilità di scambio di dati più difficoltose da realizzare sarebbero:

1. implementazione di *DLL* RTM nel sistema Qualital;
2. uso del protocollo di comunicazione *DDE*.

Date le caratteristiche dei dati forniti dal sistema RTM, nell'ambito del sistema Qualital sono stati sviluppati i moduli che realizzano la comunicazione secondo due vie possibili:

1. trasmissione via TCP/IP (si veda paragrafo 4.2- *Programma per il controllo di saldature*): la maschera relativa al modulo di programma che gestisce la comunicazione è illustrata nel Capitolo 4 sull'architettura del software;
2. sviluppo di un modulo del programma di controllo in grado di gestire i file nel formato **.cam*, come resi disponibili dal sistema RTM: sia che le immagini siano fornite come filmato digitale, raccolte in un unico file, o che siano fornite come sequenze di file *cam*, il software di controllo è in grado di aprire il file e leggerlo (si veda il paragrafo 2.3- *Hardware per acquisizione immagini realizzato da RTM* per la descrizione della struttura del file **.cam*). In seguito, può compiere elaborazioni sulle immagini con estrazione di dati utili per il controllo, e salvarle come sequenza di immagini in formato standard (per esempio, *tif*). Per esempio, dato una coppia di file *spi.cam*, uno per le immagini della pozza e uno per quelle del cordone, il software di conversione crea automaticamente due sottodirectory *\cold* ed *\hot* in cui si salvano, durante l'acquisizione, immagini BMP o TIF (a scelta) con nomi su 5 cifre, in ordine crescente. Esempio:

c:\spi\cold\00000.tif, c:\spi\cold\00001.tif, c:\spi\cold\00002.tif, ...

c:\spi\hot\00000.tif, c:\spi\hot\00001.tif, c:\spi\hot\00002.tif, ...

3- Prove sperimentali: il caso della placcatura



Introduzione

Le prove sperimentali di saldatura per l'acquisizione delle immagini, su cui compiere le elaborazioni e sviluppare gli algoritmi di riconoscimento dei difetti, sono state condotte presso lo stabilimento di Ansaldo Energia a Legnano. La tipologia di saldatura presa in esame è un'applicazione della tecnica MAG utilizzata nella ricopertura di protezione su lamiera di acciaio: la macchina saldatrice è montata su un robot antropomorfo che compie la deposizione di cordoni di saldatura affiancati sulle superficie da rivestire. Le prove sono state realizzate in tre giornate e le immagini sono state riprese sia con il sensore sviluppato da RTM, che con l'attrezzatura di ripresa del Qualital: oltre alla raccolta delle immagini, le prove hanno consentito la definizione dei difetti tipici della saldatura praticata, che si è tentato di riprodurre durante le stesse prove mediante la variazione dei parametri di lavorazione.

Nel presente capitolo viene descritta la tecnica di saldatura usata, la raccolta dei difetti tipici, l'attrezzatura di saldatura (robot e macchina saldatrice; si veda il 3.1- *Tipologia di saldatura svolta da Ansaldo Energia e difetti tipici*), l'hardware per l'acquisizione delle immagini (RTM e Qualital; si veda il 3.2- *Attrezzatura di saldatura: robot e macchina saldatrice*) e le diverse serie di prove compiute (si veda il 3.3- *Descrizione delle prove svolte*).

3.1- Tipologia di saldatura svolta da Ansaldo Energia e difetti tipici

Il robot di saldatura Ansaldo viene utilizzato per realizzare la deposizione di cordoni affiancati su piastre e pezzi forgiati in acciaio al carbonio per creare strati di rivestimenti protettivi antiossidanti; il materiale d'apporto usato è Inconel o Cupronichel. I pezzi lavorati sono componenti destinati a lavorare in atmosfere chimicamente aggressive e, in generale, fortemente ossidanti. Il rivestimento protettivo viene realizzato deponendo più strati di materiale fino a raggiungere spessori di oltre 10 mm; dopo la deposizione di ciascuno strato avviene una lavorazione alle macchine utensili per spianare la superficie prodotta, che presenta un'ondulazione dovuta all'accostamento dei cordoni saldati: alla ripresa della saldatura che produrrà lo strato di rivestimento successivo, si richiede una superficie di lavorazione piana per garantire la regolarità dei parametri di processo (stick out). Al termine della lavorazione avviene un'ultima passata di sfacciatura alle macchine utensili per riportare l'ondulazione della superficie nella tolleranza di lavorazione imposta.

Il procedimento usato è la tecnica MAG a corrente pulsata, con parametri elevati per ottenere grandi deposizioni di materiale. Per lo stesso motivo, il moto di avanzamento della torcia di saldatura lungo l'asse del giunto è accompagnato da un'oscillazione trasversale che distribuisce uniformemente il materiale d'apporto, in modo da ottenere un cordone largo e appiattito.

I tecnici Ansaldo hanno fornito utili indicazioni sui difetti tipici di questa tipologia di saldatura, descrivendo quali variazioni di parametri realisticamente verificabili nel sistema (robot+saldatrice) li provocano. Si riportano di seguito:

1. irregolarità nella larghezza del cordone dovute a variazioni della velocità di avanzamento: una variazione della velocità di avanzamento può essere legata ad una movimentazione irregolare del robot, dovuta a difettosità dei giunti del robot stesso o all'impedimento all'avanzamento rappresentato da cavi che servono la macchina saldatrice e che sono montati sulla struttura del robot stesso. L'aumento/diminuzione della velocità provocano una diminuzione/aumento della deposizione di materiale nell'unità di tempo, da cui le irregolarità di forma (larghezza e, probabilmente, altezza e convessità del cordone);
2. irregolarità nell'altezza e convessità del cordone dovute a variazioni di corrente o di stick out: la macchina di saldatura usata da Ansaldo è *sinergica*, cioè possiede un controllo dei valori impostati di corrente e tensione che effettua una autoregolazione dei parametri elettrici in modo da mantenere costante la potenza elettrica impiegata (prodotto tensione-corrente), tuttavia le variazioni dei singoli parametri sono possibili;
3. porosità dovute all'allontanamento del flusso di gas protettivo dalla zona di saldatura: questa condizione non può verificarsi per un'interruzione dell'alimentazione del gas, che produrrebbe un segnale di allarme da parte dell'unità di controllo del robot, ma a causa di un colpo d'aria che elimini la protezione di gas proprio al di sopra della pozza. Lo stesso difetto può essere provocato dalla presenza di sporco sulle superficie di lavoro a seguito di una pulizia non corretta;
4. ossidazioni dovute alle stesse cause illustrate al punto precedente (3. porosità);
5. distacco o sovrapposizione tra due cordoni adiacenti dovuto ad un errore di posizionamento o di deformazione dei pezzi e di inseguimento della traiettoria da parte del robot che provoca una variazione dell'interasse tra cordoni adiacenti nel corso di una passata di deposizione.

Corrente	280 – 290 A
Tensione	30 – 35 V
Velocità di avanzamento	180 – 250 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	18 mm
Ampiezza di oscillazione della torcia di saldatura	± 7 mm
Disassamento tra due cordoni adiacenti ('<i>stick off</i>')	12 mm
Diametro del filo elettrodo	1,6 mm

Tabella 3.1: Parametri di lavorazione nel procedimento di ricopertura

Gli intervalli di valori di parametri per una corretta saldatura sono quelli riportati nella Tabella 3.1.

In sintesi si riportano le informazioni sui difetti e sulle loro cause nella seguente Tabella 3.2.

Nome del difetto	Morfologia del difetto	Causa del difetto (dipendenza dai parametri di saldatura)
Diminuzione della larghezza del cordone	Riduz. di area e larghezza del cordone	Aumento della velocità di avanzamento
Aumento della larghezza del cordone	Aumento di area e larghezza del cordone	Diminuzione della velocità di avanzamento
Diminuzione dell'altezza media del cordone	Riduzione di altezza del cordone	Aumento della velocità
Aumento dell'altezza media del cordone	Aumento dell'altezza del cordone	Diminuzione della velocità
Porosità	Irregolarità del cordone con discontinuità e spruzzi	Allontanamento del gas protettivo / Presenza di sporco (grasso)
Ossidazioni	Irregolarità del cordone con discontinuità e spruzzi	Allontanamento del gas protettivo / Presenza di sporco (grasso)
Irregolarità di raccordo tra cordoni adiacenti (solco o ricopertura eccessiva)	Solco centrale o innalzamento del profilo al centro (sul raccordo)	Aumento o diminuzione dell'interasse tra due cordoni adiacenti / irregolarità dello stick off

Tabella 3.2: Schema dei difetti della saldatura usata presso l'Ansaldo Energia: morfologia e causa del difetto

3.2- Attrezzatura di saldatura: robot e macchina saldatrice

Il robot usato per il processo di placcatura è un robot antropomorfo a 5 gradi di libertà al cui *end effector* è fissata la torcia di saldatura di una macchina saldatrice MIG/MAG *sinergica*, cioè con un sistema di controllo sui parametri elettrici in grado di compensare le variazioni di tensione e corrente, mantenendo costante il loro prodotto (potenza elettrica di saldatura).

L'unità centrale del robot gestisce la movimentazione degli assi e permette l'impostazione delle condizioni di saldatura della macchina: essa imposta tutti i parametri, geometrici ed elettrici, del processo e loro eventuali variazioni durante una passata di deposizione. Tuttavia non è in grado di registrarli e misurarli nel corso della lavorazione: ciò ha impedito di conoscere i valori istantanei reali dei parametri stessi durante le prove svolte. Per i valori della velocità di avanzamento, di stick out e

stick off (parametri geometrici), sono note solo le impostazioni iniziali e le variazioni previste. Per la tensione e la corrente (parametri elettrici), sono state compiute letture su indicatori analogici (voltmetro e amperometro della saldatrice) durante lo svolgimento del processo

3.3- Descrizione delle prove svolte

Le prove di saldatura con acquisizione delle immagini sono state compiute in tre occasioni e con i due diversi sensori, RTM e Qualital.

3.3.1- Prove di saldatura con sensore Qualital (Legnano – 20/09/1999)

Il sensore Qualital usato per l'acquisizione delle immagini in questa serie di prove è costituito da:

- una telecamera CV-M50, in bianco e nero, con uno zoom M6Z 1212 (12.5 –75 mm, F1,2) e un filtro RG 780 montato di fronte all'obiettivo durante la ripresa della pozza di saldatura;
- un laser He-Ne che emette nel visibile (rosso) di potenza pari a 5 mW, con lente cilindrica.

Il segnale proveniente dalla telecamera veniva trasmesso ad una scheda di acquisizione di immagini Matrox Meteor 1 MultiChannel montata su PC (Pentium II); la visualizzazione e il salvataggio delle immagini ottenute sono state gestite mediante il software Ivision sviluppato in Visual Basic.

Il sensore sopra descritto è stato montato su uno dei bracci del robot di saldatura ad una distanza opportuna dall'end effector, dove si trova la torcia di saldatura, per motivi di sicurezza: poiché la telecamera e il laser non sono dotati di un opportuno sistema di schermatura e raffreddamento non possono sopportare le condizioni di elevata temperatura ed emissione di particelle incandescenti in prossimità della regione di saldatura. Lo schema dell'attrezzatura usata è illustrato in Figura 3.1.

Le condizioni di lavoro sono variate rispetto ai parametri illustrati in Tabella 3.1, come illustrato nella seguente Tabella 3.3.

Parametri	Prove del 20-09-99
Corrente	260 – 270 A
Tensione	34 – 35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	17 – 18 mm
Interasse tra cordoni adiacenti	12 mm
Diametro filo elettrodo	1,2 mm

Tabella 3.3: Parametri di lavorazione nel procedimento di ricopertura

I parametri sono leggermente ridotti in base alla scelta di un diametro minore del filo elettrodo (filo in acciaio inossidabile 316L, di diametro 1,2 mm invece dei normali 1,6 mm).

I parametri di processo sono riportati in **Tabella 3.1**:

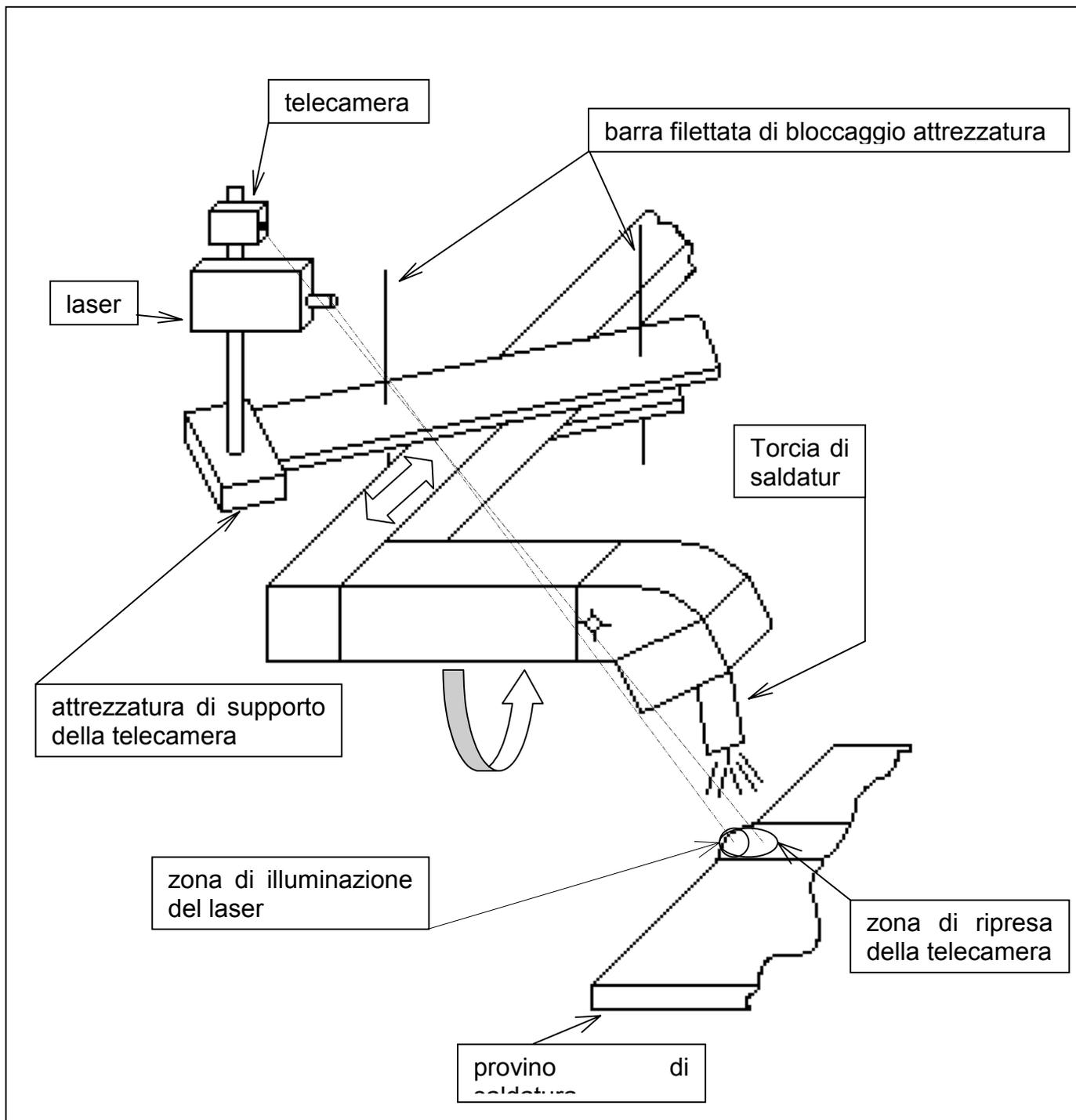


Figura 3.1: Schema dell'attrezzatura montata sul robot Motomar di saldatura dell'Ansaldo Energia

L'acquisizione delle immagini, a causa della struttura dell'attrezzatura di ripresa, si è svolta come descritto di seguito: le immagini della parte calda (pozza) e fredda (profilo laser) sono state acquisite separatamente per ogni sequenza (disponendo di una sola telecamera e di un laser non adatto ad illuminare il profilo durante la

lavorazione) e con una minore risoluzione (la telecamera è montata a distanza maggiore dall'end-effector).

Sono state condotte 9 passate di saldatura in totale, di cui la prima usata per aggiustare i valori dei parametri corrente e tensione per ottenere un arco stabile (i parametri scelti sono quelli riportati in Tabella 3.3). Nelle successive, dopo un tratto iniziale pari a 10 cm di cordone, i parametri base sono stati variati simulando un evento di difetto volta per volta. Tutte le prove sono state salvate su CD ROM e registrate su nastro. Di seguito si descrivono nel dettaglio le prove condotte:

1. Prova di definizione dei parametri ottimali (masterizzata su CD 'Legnano4_200999' nelle cartelle 'provaWeld' e 'ProvaWeld2': nella prima è presente la ripresa della pozza e del profilo laser con moto oscillatorio; nella seconda la sola ripresa del profilo laser con moto traslazionale). Durante la prova i valori di tensione e corrente sono stati variati senza un programma preimpostato; nella seguente Tabella 3.4 sono riportati i risultati delle letture all'ampmetro e al voltmetro della saldatrice:

	Corrente (A)	Tensione (V)	Velocità (mm/min)	Stick out (mm)
lettura I	220	28	180	15
lettura II	260 – 265	30	180	15
lettura III	160 – 180	30	180	15
lettura IV	270 – 280	34 – 35	180	15

Tabella 3.4: Lettura dei parametri relativi alla prova di definizione delle condizioni di processo

2. Prova di interruzione del flusso di gas protettivo sulla pozza di saldatura mediante allontanamento con getto di aria compressa (masterizzata su CD 'Legnano3_200999' nella cartella 'AirJet'). La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.5:

Corrente	240 –260 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 – 17 mm

Tabella 3.5: Parametri di processo nella prova 'AirJet'

Difetto simulato: porosità e ossidazioni.

Risultato: l'effetto dell'allontanamento del gas protettivo non è stato la formazione di porosità nel cordone, almeno affioranti alla superficie, ma solo una deformazione del suo profilo dovuta alla pressione del getto d'aria sul metallo fuso della pozza: esso ha subito uno spostamento verso il lato opposto a quello di

provenienza dell'aria compressa. Tuttavia, l'allontanamento del gas di protezione ha provocato anomalie del fenomeno visibili come irregolarità di forma e dimensioni dell'arco elettrico (però mai un suo completo spegnimento), e frequenti fumate. Non sono risultate brusche variazioni dei parametri della saldatura (nessun picco negativo di corrente).

3. Prova di interruzione del flusso di gas protettivo sulla pozza di saldatura mediante allontanamento con getto di aria compressa (masterizzata su CD 'Legnano3_200999' nella cartella 'AirJet2'). La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.6:

Corrente	240 –260 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 – 17 mm

Tabella 3.6: Parametri di processo nella prova 'AirJet2'

Difetto simulato: porosità e ossidazioni.

Risultato: come nel caso precedente (3. AirJet) nelle immagini si osservano variazioni brusche di forma e dimensioni dell'arco elettrico (più marcate rispetto ad 'Airjet': per es., ci sono immagini in cui l'arco è quasi completamente spento); tuttavia, non sono stati misurati cambiamenti dei parametri del processo. Invece si possono osservare più marcate irregolarità del cordone realizzato, corrispondenti a porosità affioranti e a ossidazioni.

4. Prova con diminuzione della velocità di avanzamento (masterizzata su CD 'Legnano4_200999' nella cartella 'Velocity-'). Dopo 10 cm di cordone realizzato con i parametri ottimali, la velocità viene ridotta gradualmente fino ad un massimo del 30%. La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.7:

Corrente	260-270 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 ⇒ 125 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 – 17 mm

Tabella 3.7: Parametri di processo nella prova 'Velocity-'

Difetto simulato: aumento della larghezza e dell'altezza del cordone.

Risultato: il cordone presenta le irregolarità previste. Non è possibile affermare lo stesso per quanto riguarda la pozza, poiché le immagini raccolte non consentono di valutarne le variazioni di forma e dimensioni, essendo molto scure e risultando

difficile individuare la separazione tra pozza e sfondo senza realizzare una binarizzazione.

5. Prova con aumento della velocità di avanzamento (masterizzata su CD 'Legnano4_200999' nella cartella 'Velocity+'). Dopo 10 cm di cordone realizzato con i parametri ottimali, la velocità viene aumentata gradualmente fino ad un massimo del 30%. La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.8:

Corrente	260-270 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 ⇒ 235 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 – 17 mm

Tabella 3.8: Parametri di processo nella prova 'Velocity+'

Difetto simulato: diminuzione della larghezza e dell'altezza del cordone.

Risultato: il cordone presenta le irregolarità previste. Non è possibile affermare lo stesso per quanto riguarda la pozza, poiché le immagini raccolte non consentono di valutarne le variazioni di forma e dimensioni, essendo molto scure e risultando difficile individuare la separazione tra pozza e sfondo senza realizzare una binarizzazione.

6. Prova con aumento dello stick out (masterizzata su CD 'Legnano5_200999' nella cartella 'Stick out+'). Dopo 10 cm di cordone realizzato con i parametri ottimali, lo stick out viene aumentato gradualmente fino ad un massimo di 5mm. La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.9:

Corrente	260-270 ⇒ 230-240 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 -17 ⇒ 21 –22 mm

Tabella 3.9: Parametri di processo nella prova 'Stick out+'

In corrispondenza dell'aumento di stick out si registra una diminuzione della corrente che passa dal valore ottimale di 260 –270 A a 230 – 240 A.

Difetto simulato: Variazione delle dimensioni di pozza e del cordone.

Risultato: nessun effetto visibile sulla pozza o sul cordone.

7. Prova con diminuzione dello stick out (masterizzata su CD 'Legnano5_200999' nella cartella 'Stick out-'). Dopo 10 cm di cordone realizzato con i parametri ottimali, lo stick out viene aumentato gradualmente fino ad un massimo di 5mm. La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.10.

In corrispondenza dell'aumento di stick out si registra un aumento della corrente che passa dal valore ottimale di 260 –270 A a 280 – 290 A.

Difetto simulato: Variazione delle dimensioni di pozza e del cordone.

Risultato: nessun effetto visibile sulla pozza o sul cordone.

Corrente	260-270 ⇒ 280-290 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 -17 ⇒ 11 –12 mm

Tabella 3.10: Parametri di processo nella prova 'Stick out-'

8. Prova con aumento del disassamento (riguardo ad esso si parla per comodità di *stick off*) rispetto al cordone adiacente (masterizzata su CD 'Legnano6_200999' nella cartella 'Stick off+'). Dopo 10 cm di cordone realizzato con i parametri ottimali, lo *stick off* viene aumentato gradualmente fino ad un massimo di 7mm; il valore usuale dell'interasse tra due cordoni è di 12 mm. La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.11:

Corrente	260-270 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 -17 mm

Tabella 3.11: Parametri di processo nella prova 'Stick off+'

Difetto simulato: separazione tra due cordoni adiacenti con ingobbamento centrale del profilo.

Risultato: difetto previsto visibile sul cordone. Naturalmente, nessuna irregolarità è visibile nella regione della pozza.

9. Prova con diminuzione dello *stick off* rispetto al cordone adiacente (masterizzata su CD 'Legnano6_200999' nella cartella 'Stick off-'). Dopo 10 cm di cordone realizzato con i parametri ottimali, lo *stick off* viene diminuito gradualmente fino ad un massimo di 7mm. Inoltre, viene depositato del grasso sulla traiettoria dell'elettrodo, per simulare presenza di sporco sulla superficie di lavoro. La lettura dei parametri è riportata in Tabella 3.12. Come risulta dalla tabella, non sono stati registrate variazioni di corrente o di tensione in corrispondenza della macchia di grasso sulla superficie; i parametri di processo elevati hanno causato l'evaporazione istantanea dello sporco, che si è dissolto senza poter influire sull'andamento della saldatura.

Difetto simulato: i difetti che si è tentato di riprodurre sono stati due su diversi tratti del cordone: formazione di porosità e ossidazioni in presenza di sporco

(grasso depositato) sulla superficie di lavorazione, e sovrapposizione tra due cordoni adiacenti con innalzamento centrale del profilo per effetto dello stick off decrescente.

Risultato: sul cordone non sono state prodotte porosità né ossidazioni; è invece evidente all'osservazione la sovrapposizione del cordone appena prodotto al cordone adiacente. La regione della pozza presenta irregolarità in corrispondenza della presenza di sporco, con la formazione di fumate e qualche spruzzo; non presenta alterazioni per effetto della variazione di stick off.

Corrente	260-270 A
Tensione	34 –35 V
Velocità di avanzamento	180 mm/min
Frequenza di oscillazione	1 Hz
Stick out	16 -17 mm

Tabella 3.12: Parametri di processo nella prova 'Stick off-'

I campioni di saldatura prodotti durante le prove svolte con il sensore Qualital sono stati conservati e utilizzati al fine dell'analisi delle immagini, per una verifica della correttezza del controllo.

3.3.2- Prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 15/07/1999)

Sono state realizzate tre prove di saldatura con deposizione di cordoni sulla superficie di una piastra in acciaio al carbonio. Il materiale d'apporto usato è stato un filo in acciaio inossidabile 316L, di diametro 1,6 mm.

In ciascuna prova la lunghezza del tratto da saldare è stata suddivisa in quattro parti uguali; al passaggio da un intervallo al successivo è stata compiuta la lettura dei parametri del processo (tensione, corrente, velocità di avanzamento); i valori dei parametri sono stati rilevati manualmente poiché non esiste un sistema di registrazione automatica. La lettura del valore di corrente deve considerarsi influenzata dalla variazione di questa grandezza durante la lavorazione (corrente pulsata): in ogni caso, l'operatore ha rilevato il valore massimo raggiunto dalla corrente.

La prima prova ha avuto come obiettivo la riduzione dei parametri di processo fino a determinare quelli minimi accettabili per garantire la stabilità dell'arco elettrico usando il filo delle caratteristiche sopra descritte; a partire dai valori individuati, nelle successive prove sono stati variati i parametri al passaggio da un intervallo di saldatura al successivo per simulare alcuni difetti tipici di questo tipo di giunto:

- prova 2: variazione di velocità;
- prova 3: variazione dello stick out, eliminazione del gas di protezione e presenza di sporco sulla superficie del pezzo.

1. Lo stick out è stato ridotto a 15 mm. A partire da 280 A, la corrente è stata ridotta ad ogni step di saldatura, come indicato in Tabella 3.13:

	Corrente (A)	Tensione (V)	Velocità (cm/min)	Stick out (mm)
Step I	275 – 280	30	18	15
Step II	260 – 265	28	18	15
Step III	240 – 250	27	18	15
Step IV	230 – 235	25	18	15

Tabella 3.13: Parametri di processo nella prova I

Nel corso degli step I e II i parametri di saldatura sono stati ancora elevati e sono stati osservati spruzzi depositati nell'intorno del cordone. Lo step III è caratterizzato dai parametri di saldatura più bassi ammissibili per assicurare la stabilità dell'arco; infatti durante lo step IV, in cui i parametri sono stati ancora diminuiti, si sono osservati frequenti spegnimenti dell'arco.

2. A partire dai parametri base, corrispondenti al terzo step della prova precedente, è stata modificata la velocità di avanzamento; essa è stata aumentata, nel passaggio da uno step al successivo, a partire da 14 *cm/min* (80% del valore base) fino a 25 *cm/min* (140% del valore base). I valori dei parametri sono riportati in Tabella 3.14:

	Corrente (A)	Tensione (V)	Velocità (cm/min)	Stick out (mm)
Step I	260 – 270	28	14	15
Step II	260 – 270	28	18	15
Step III	260 – 270	28	22	15
Step IV	260 – 270	28	25	15

Tabella 3.14: Parametri di processo nella prova II

Il tratto di cordone corrispondente al primo step è risultato eccessivamente convesso; sono state raggiunte le condizioni ottimali nel secondo step. Nei successivi (step III e IV) si è osservato un restringimento marcato del cordone e una diminuzione della sua altezza. Tuttavia, al passaggio da uno step al successivo, è stata rilevata un'irregolarità nella variazione della larghezza del cordone, il quale subiva un allargamento e poi un restringimento, invece che continuare a restringersi monotonamente. Ciò è probabilmente dovuto all'inerzia del sistema nella variazione della velocità, che veniva cambiata proprio alla fine di ogni step.

3. In questa prova lo stick out è stato fatto variare aumentandolo nella prima metà di cordone da 15 a 22,5 *mm* e riducendolo di nuovo a 15 *mm* nella seconda metà. Inoltre, nel corso dello step III è stata simulata l'assenza di gas protettivo, investendo la zona terminale della torcia e l'elettrodo con un getto di aria compressa. Infatti il robot è dotato di un flussometro che misura la continuità di emissione del gas e manda un segnale di allarme nel caso in cui il flusso di gas diminuisca oltre un certo limite; in questo caso, la saldatura viene interrotta:

tuttavia il gas potrebbe essere asportato dalla zona di saldatura per effetto di un colpo di vento. Infine, nel corso dello step IV è stato deposto dell'olio sul pezzo in corrispondenza della traiettoria dell'elettrodo, allo scopo di simulare la formazione di fumo per presenza di sporco sul pezzo. È risultata interessante la diminuzione di corrente causata sia dall'aumento dello stick out, che dall'eliminazione del gas e dalla presenza dell'olio; tale diminuzione non è stata accompagnata da alcuna variazione della tensione: ciò è dovuto all'azione regolatrice del sistema di controllo del robot di saldatura, che lavora a tensione costante. L'effetto più evidente della variazione dei parametri sull'aspetto del cordone è stata la formazione di porosità su tutto il tratto in cui il gas protettivo è stato eliminato.

	Corrente (A)	Tensione (V)	Velocità (cm/min)	Stick out (mm)
Step I	265 – 270	30	18	15
Step II	230 (max. stick out)	30	18	↓ 22,5
Step III	200 ÷ 220 (aria compr.)	30	18	↓
Step IV	210 (olio)	30	18	15

Tabella 3.15: Parametri di processo nella prova III

3.3.2- Prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 20/09/1999)

Una successiva serie di prove è stata svolta acquisendo le immagini con il sensore RTM: rispetto alla prima serie di prove il sensore ha subito alcune modifiche per ottenere una migliore qualità delle immagini di saldatura, e particolarmente delle immagini della linea laser, fortemente disturbate dal bagliore della luce dell'arco elettrico (si veda i paragrafi 2.3- *Hardware per acquisizione delle immagini realizzato da RTM* e 3.4.2- *Immagini ottenute durante le prove svolte con il sensore RTM – Legnano 15/07/1999*). Un'ulteriore modifica è stata apportata alla torcia di saldatura, sulla quale è stata montata una scarpetta in lamiera, che faccia da schermo alla luce dell'arco rispetto alla telecamera per la ripresa della linea laser.

I risultati delle prove sono stati raccolti in un CD di immagini, inviato da RTM, e corredato da una scheda che descrive sinteticamente gli obiettivi, i parametri usati e i risultati di ciascuna sequenza di saldatura. Sono state realizzate dieci prove in tutto, di cui:

- le prime tre sono state dedicate alla messa a punto della visione della lama laser: è stata verificata l'efficacia dell'aumento della potenza del laser usato. Successivamente, è stata eliminata la scarpetta di tungsteno, non potendo resistere alle elevate temperature della regione di saldatura (in questo caso, si osserva un aumento del disturbo della luce dell'arco); dunque, si è proceduto alla modifica dell'obiettivo della telecamera, tagliando la zona aperta del diaframma con una striscia di nastro. Insieme, è stata rinforzata la scarpetta di tungsteno con del nastro ceramico fornito da Ansaldo;
- altre tre prove sono state finalizzate alla messa a punto del sistema di filtraggio: al filtro RG 780 già usato (si veda il paragrafo 2.3- *Hardware per l'acquisizione di immagini realizzato da RTM*) sono stati aggiunti: un secondo filtro RG 780, durante la prima prova; un filtro neutro 4x1000, nella seconda prova; due filtri neutri, 4x1000 e SNG3, nella terza prova. Nei primi due casi, non si sono

- osservate sostanziali differenze nelle immagini; nel terzo, la luminosità dell'arco viene eccessivamente ridotta;
- le ultime quattro prove sono state realizzate al fine di produrre difetti di saldatura:
 1. interruzioni del gas di protezione, per ottenere porosità ed ossidazioni, nella prova 7;
 2. riduzione del voltaggio, da 35 a 28 V, nella prova 8;
 3. aumento dello stick out, da 12 a 19 mm, nella prova 9;
 4. riduzione della velocità di avanzamento da 25 a 12.5 cm/min, nella prova 10.

3.4- Risultato delle prove: descrizione delle sequenze di immagini ottenute

In questo paragrafo si descrivono i risultati delle prove di saldatura realizzate sia con il sensore RTM, che con il sensore Qualital.

3.4.1- Immagini ottenute durante le prove svolte con il sensore Qualital (Legnano, 20/09/1999)

Le immagini ottenute come risultato delle prove svolte con il sensore Qualital sono descritte in dettaglio in Appendice A. Al termine del capitolo, si riporta la Tabella 3.16, che descrive in sintesi i risultati delle prove (Legnano, 20/09/1999).

3.4.2- Immagini ottenute durante la prima serie di prove svolte con il sensore RTM (Legnano, 15/07/1999)

Le sequenze di immagini riprese mediante il sensore RTM, disponibili per l'elaborazione, sono le seguenti:

- 26 sequenze su CD ROM inviato da RTM, con immagini di prove di saldatura svolte presso RTM (22 sequenze di immagini della pozza e 4 della linea laser);
- 7 sequenze, su CD ROM, di immagini delle prove di saldatura svolte presso Ansaldo Energia il 15/07/1999 (6 sequenza di immagini della pozza e 1 della linea laser).

Tutte le sequenze sono disponibili nel formato '.cam' (Casio Camera Format); con il CD ROM sono stati anche inviati i programmi per la visualizzazione (DigitalVCR06) e la conversione in formato *bitmap*.

La risoluzione delle immagini acquisite dal sensore è 600x250.

Tutte le sequenze di immagini disponibili sono state esaminate allo scopo di osservare le caratteristiche delle immagini del sensore e di rilevare gli eventi del processo di saldatura che in esse sono visibili: i commenti e le osservazioni riportate saranno utili per l'impostazione degli algoritmi di estrazione delle feature dalle immagini e per l'interpretazione dei risultati che tali algoritmi produrranno.

Le sequenze su CD ROM sono raccolte in tre cartelle:

1. '08-04-99PozIt': 11 sequenze di immagini della pozza;
2. '10-06-99PozLamNI': 8 sequenze, 4 di immagini della pozza e 4 del profilo laser;
3. '30-03-99PozIt': 7 sequenze di immagini della pozza.

Le due sequenze delle prove svolte a Legnano sono raccolte in "\\Vision\weld\SPI".

Dall'analisi delle sequenze è risultato che alcune presentano una quantità di disturbi da rendere impossibile l'elaborazione; si tratta delle seguenti:

1. nella cartella '08-04-99PozIt':

- Dist1_0: le immagini risultano sfocate e molto luminose per il disturbo dell'arco; non si riesce ad individuare il margine della pozza;
 - Int350_0: è presente una zona saturata (bianca) al centro di tutte le immagini, che copre interamente la pozza;
 - SoloVArcOff_0: immagini completamente buie;
2. nella cartella '30-03-99PozIt':
- 4_0, 5_0, 6_25_0, 7_0, zigzag: immagini fortemente disturbate dal bagliore dell'arco;
3. nella cartella '\\Vision\weld\SPI', nella sequenza di immagini della linea laser è quasi impossibile distinguere il profilo del giunto per il forte disturbo dell'arco (cfr. 'Relazione sulla giornata di prove di saldatura presso Ansaldo Energia (Legnano) - 15/07/1999').

Di seguito, per ognuna delle altre sequenze, si riportano alcuni commenti e si elencano in apposite tabelle gli eventi rilevati nel corso delle sequenze. Gli eventi ricorrenti sono:

1. estensione della zona saturata su una grande parte dell'immagine, fino a coprire completamente la pozza, dovuta ad insufficiente schermatura dell'obiettivo della telecamera (diaframma troppo aperto);
 2. arco spento, a saldatura non ancora avviata o a saldatura terminata;
 3. arco spento o molto debole e poco esteso, durante saldature in modalità short arc: le immagini corrispondenti sono molto interessanti perché in esse è interamente visibile la pozza di saldatura, essendo molto ridotto il disturbo dell'arco. In particolare, si osserva che i margini della pozza di saldatura risultano nettamente più luminosi della zona centrale: ciò può essere d'aiuto nella ricerca dei confini della pozza stessa (per esempio, con estrazione dei contorni verticali);
 4. irregolarità dell'arco: casi di instabilità, con arco di forma fortemente frastagliata, o fiammate dell'arco, in cui il forte bagliore ricopre interamente o quasi la pozza;
 5. fumo;
 6. spruzzi;
 7. casi di immagini molto nitide, in cui sia l'arco che la pozza sono chiaramente individuabili e tra loro distinti.
- a) Sequenza 08-04-99 Poz It/340 zig_0: nel corso della saldatura la torcia viene fatta oscillare trasversalmente alla direzione di avanzamento in modo tale da realizzare un cordone a zig-zag.
- Nelle immagini si osservano lo spostamento e la variazione di forma della pozza: in particolare, nei punti di cambiamento della direzione di avanzamento, si osserva che le dimensioni della pozza aumentano interessando una porzione ampia dell'immagine (quasi la metà inferiore). Ciò costituirebbe un motivo di disturbo nell'estrazione delle feature della pozza, introducendo una variazione periodica dei dati (area, larghezza, perimetro della pozza). Ne segue che le immagini di questa sequenza possono essere utili per una messa a punto del programma di riconoscimento della pozza ed estrazione delle feature relative, ma non per lo sviluppo del programma di controllo.
- b) Sequenza 08-04-99 Poz It/ciaV20_0: le immagini sono riprese con un angolo molto grande di inclinazione della telecamera rispetto al piano orizzontale di lavoro (quasi verticale) e solo la metà posteriore della pozza è visibile.

Le immagini sono riprese in modalità interlacciata, in modo che ogni fotogramma risulta dalla sovrapposizione, a righe alternate, di due inquadrature: si osserva chiaramente una coda di intensità luminosa leggermente inferiore alla parte centrale della pozza, dovuta alla sovrapposizione di due immagini della pozza in posizioni diverse di avanzamento.

- c) Sequenza 08-04-99 Poz It/ciaV20b_0: le immagini sono molto disturbate, fuori fuoco e con un campo di ripresa troppo ristretto, in modo che la pozza non è mai completamente inquadrata.
- d) Sequenza Largh21V: il campo di ripresa è limitato e la coda della pozza è sempre tagliata dall'immagine.
- e) Sequenza 08-06-99 PozIt\ zig2_0: la saldatura è realizzata con avanzamento a zig-zag (come per la sequenza 08-04-99 Poz It/340 zig_0).
- f) Sequenza 10-06-99 PozLamNI \ 21V5Mb_0: in questa sequenza, le immagini della pozza sono sempre tagliate, cosicché non risulta visibile la coda.
- g) Sequenza 10-06-99\21V5Mb_1: si osservano proiezioni di materiale incandescente dalla zona della pozza, che attraversano il campo di ripresa della linea laser con una scia luminosa di debole intensità (non dovrebbero costituire disturbo nell'elaborazione delle immagini); solo in un caso (immagine n°. 25), l'intensità luminosa è pari a quella del profilo laser.
- h) Sequenza 10-06-99 PozLamNI \ 21V5MM_1: come nella sequenza precedente, si osserva proiezione di materiale incandescente dalla pozza (spruzzi), ma con scia di debole intensità luminosa. A partire dall'immagine n°. 60, è presente un tratto di cordone deformato dalla presenza di porosità di grandi dimensioni.
- i) Sequenza 10-06-99 PozLamNI \ GiuVPozDietr_0: la saldatura è stata eseguita con avanzamento all'indietro, in modo che il sensore riprendesse la pozza dalla parte anteriore; nelle immagini in cui essa è nitidamente visibile (in particolare, tutte quelle ad arco spento) è possibile osservare il fronte della pozza. Inoltre, la sequenza è divisa in due tratti: dopo un'interruzione della saldatura, avviene una ripresa con la realizzazione di un giunto non piano (probabilmente, un giunto ad angolo: imm. n°. 54 –107).
- j) Sequenza 30-03-99 PozIt \ 2_0: le immagini presentano sempre un forte alone dell'arco, che si estende su un'ampia porzione del campo di ripresa.
- k) Sequenza 30-03-99 PozIt \ 3_0: rispetto alla sequenza precedente, le immagini risultano ancora più disturbate dal bagliore dell'arco.

Dall'analisi qualitativa delle sequenze relative alle prove di saldatura svolte presso Ansaldo Energia risultano le seguenti osservazioni generali:

- tutte le immagini sono riprese al rovescio, cioè con la torcia nella parte inferiore e la pozza nella parte superiore (ovvero la linea laser nell'unica sequenza di immagini 'fredde');
- in tutte le immagini della parte calda, la pozza non è mai visibile per intero. Inoltre, la sua posizione cambia all'interno del campo di ripresa per effetto dell'oscillazione trasversale del sensore solidalmente alla torcia di saldatura: come conseguenza, la parte della pozza che risulta esclusa dall'immagine cambia nel corso della sequenza. Ciò impedisce l'elaborazione per la misura delle caratteristiche geometriche della pozza stessa;
- tutte le immagini presentano una vasta zona saturata, anche quelle relative a prove di saldatura con parametri ridotti: l'effetto di saturazione del sensore CCD è evidente nelle immagini terminali della saldatura, al momento dello spegnimento dell'arco (per esempio, nella sequenza 'campo40_0'); nell'istante in cui l'arco si spegne, l'immagine ripresa risulta pressoché buia, mentre le successive due o tre immagini sono progressivamente più

luminose per effetto dell'incandescenza del cordone appena terminato, per tornare di nuovo buie a raffreddamento completato.

Le sequenze presenti su CD sono le seguenti Ansaldo (cfr. 'Relazione sulle prove di saldatura svolte presso Ansaldo Energia'):

- a) 280V_0: prova di saldatura svolta con parametri tipici delle saldature Ansaldo;
- b) 240A_0: prova di saldatura svolta con parametri ridotti rispetto a quelli tipici delle saldature; i parametri di processo sono stati ridotti nel corso della prova per determinare i valori minimi capaci di assicurare la stabilità dell'arco;
- c) 3_0: prova di saldatura svolta con i parametri minimi stabiliti con la prova precedente (seq. 240A_0);
- d) 4_0: prova di saldatura con aumento e diminuzione dello stick out, eliminazione del flusso di gas protettivo e presenza di grasso sulla superficie in lavorazione;
- e) 5_0: prova di saldatura con graduale diminuzione della velocità di avanzamento;
- f) campo40_0.

Si riportano alcune osservazioni in dettaglio per ciascuna sequenza di immagini:

- a) Sequenza '280V_0' (490 imm.): la saldatura è svolta con avanzamento al contrario e le immagini mostrano la pozza ripresa dalla parte anteriore; tutta la sequenza risulta fortemente disturbata dal bagliore dell'arco;
- b) Sequenza '240A_0' (1274 imm.): la diminuzione dei parametri di saldatura comporta un debole miglioramento della qualità delle immagini, con la riduzione del disturbo dell'arco. L'arco risulta sempre abbastanza luminoso ed è caratterizzato da forme e dimensioni molto variabili da un'immagine all'altra (immagini con forte variabilità dell'arco sono : 14-15, 37-38, 41-42, ecc. ;inoltre, sono presenti immagini con arco molto esteso: 42 - 53 - 68 - 81; e immagini con arco molto debole: 14 - 46 - 48 - 52 - 57 - 65 - 83). Come al solito, le immagini ad arco spento sono molto interessanti perché sono le uniche in cui la pozza è visibile interamente.

Si osserva chiaramente il fenomeno dell'oscillazione della posizione della pozza nell'immagine, trovandosi la coda alternativamente a destra o a sinistra dell'arco (è possibile rilevare con quale frequenza avviene questo spostamento all'interno dell'immagine).

Alla riduzione della corrente non sembra corrispondere una variazione delle dimensioni della pozza, almeno in seguito ad un'analisi visiva; sembra invece diminuire leggermente l'estensione della macchia bianca dell'arco elettrico.

La diminuzione dei parametri comporta un effetto evidente nell'ultimo tratto della saldatura (dall'imm. n°. 680 fino al termine della prova), in cui si osserva una forte instabilità dell'arco con spegnimenti sempre più frequenti. In questa fase della sequenza, la pozza è meglio visibile per la riduzione del bagliore dell'arco: si osservano i riflessi luminosi sulle increspature del metallo fuso e le goccioline di metallo che cadono sulla pozza stessa.

- c) Sequenza '3_0': le immagini sono molto simili a quelle del tratto centrale della sequenza precedente (240A_0), perché sono svolte con gli stessi parametri.
- d) Sequenza '4_0': il campo di ripresa è troppo limitato, in modo che la pozza viene sempre tagliata nella parte posteriore; ciò risulta sempre più evidente nell'intervallo di immagini 300 - 400 in cui lo stick out cresce fino al valore massimo (cfr. 'Relazione sulle prove di saldatura svolte presso Ansaldo Energia') e poi viene di nuovo ridotto.

Si osserva un tratto di forte instabilità dell'arco (frequenti accensioni e spegnimenti) e formazione di fumo e spruzzi (imm. n°. 380 – 460), corrispondente all'allontanamento del gas protettivo. L'intervallo di immagini dalla n°. 580 alla 720, ca., è invece caratterizzato dalla presenza di fumo e spruzzi dovuti alla presenza di grasso depositato sulla superficie di lavoro.

- e) Sequenza '5_0': la prova relativa è caratterizzata dal progressivo aumento della velocità di saldatura. Tuttavia, a parte le osservazioni comuni alle sequenze precedenti (disturbo dell'arco, spostamento della pozza, ecc.), non è possibile osservare visivamente alcun effetto della variazione dei parametri di lavoro sull'aspetto delle immagini (riduzione delle dimensioni della pozza, ecc.).
- f) Sequenza 'campo40_0': come per '5_0'. Si osserva un fenomeno interessante nelle immagini finali della saldatura: in corrispondenza dell'imm. n°. 96 si verifica lo spegnimento dell'arco, in modo che tale immagine risulta quasi completamente buia e in essa non è visibile la zona di metallo ancora incandescente. Nelle immagini successive (n°. 97 e 98), la parte di metallo incandescente (compresa la punta dell'elettrodo) diventano visibili, producendo un aumento della luminosità di queste immagini: ciò è probabilmente dovuto alla saturazione del sensore CCD per effetto del forte bagliore dell'arco elettrico.
- g) Sequenza 'campo40_1': si tratta dell'unica sequenza con ripresa della linea laser. Tuttavia il disturbo della luce dell'arco risulta troppo intenso: la linea laser comincia ad essere visibile solo a saldatura terminata e con arco spento.

L'analisi delle sequenze di immagini acquisite dal sensore sviluppato da RTM permette di trarre le seguenti conclusioni:

1. solo le immagini tratte dal primo CD RTM (si veda il § 2), risultano utili per l'elaborazione e l'estrazione delle feature della pozza e del cordone, a meno dei problemi di conversione suddetti (cfr. § 4);
2. le immagini della pozza relative alle prove realizzate presso Ansaldo Energia presentano forti disturbi, ma su di esse si può tentare un'elaborazione con gli algoritmi attualmente disponibili; tuttavia, dall'analisi più si ottiene una conferma della necessità di migliorare la qualità dell'acquisizione attraverso modifiche al sensore (cfr. 'Relazione sulle prove di saldatura svolte presso Ansaldo Energia', § 6 'Conclusioni');

Le immagini della linea laser relative alle prove realizzate presso Ansaldo Energia non sono utilizzabili per l'estrazione del profilo, perché già dall'analisi visiva risulta impossibile rintracciare in esse la presenza della linea laser stessa a causa del forte disturbo dell'arco; in particolare, la modifica al sensore, che si pensa essere più immediata e di notevole importanza, è l'allargamento del campo di ripresa sia delle immagini della pozza che del giunto.

Parametri della saldatura	Prova 'AirJet'	Prova 'AirJet2'	Prova 'Velocity-'	Prova 'Velocity+'	Prova 'Stick out +'	Prova 'Stick out -'	Prova 'Stick off +'	Prova 'Stick off -'
Tensione (V)	34 - 35	34 - 35	34 - 35	34 - 35	34 - 35	34 - 35	34 - 35	34 - 35
Corrente (A)	240 - 260	240 - 260	260 - 270	260 - 270	260 - 270 ⇒ 230 - 240	260 - 270 ⇒ 280 - 290	260 - 270	260 - 270
Velocità (mm/min)	180	180	180 ⇒ 125	180 ⇒ 235	180	180	180	180
Stick out (mm)	16 - 17	16 - 17	16 - 17	16 - 17	16 - 17 ⇒ 21 - 22	16 - 17 ⇒ 11 - 12	16 - 17	16 - 17
Stick off* (mm)	12	12	12	12	12	12	12 ⇒ 19	12 ⇒ 5
Difetto simulato	Allontanamento del gas di protezione per produrre porosità	Allontanamento del gas di protezione per produrre porosità	Riduzione velocità per allargamento cordone	Aumento velocità per restringimento cordone	Aumento stick out cioè lunghezza d'arco	Diminuzione stick out cioè lunghezza d'arco	Aumento stick off cioè disassamento cordoni	Diminuzione stick off cioè disassamento cordoni
Difetto ottenuto	Ossidazioni e porosità; deform. del cordone: OTTENUTO	Ossidazioni e porosità: OTTENUTO	Aumento delle dimensioni del giunto: OTTENUTO	Diminuz. delle dimensioni del giunto: OTTENUTO	Giunto corretto: NON OTTENUTO	Giunto corretto: NON OTTENUTO	Solco centrale: OTTENUTO	Innalzam. del cord. al centro: OTTENUTO

Tabella 3.16: Risultati delle prove svolte con il sensore Qualital: tipo di immagini e difetti ottenuti.

* Come già detto nella relazione, relativamente alle prove 'Stick off +' e 'Stick off -', la dizione *stick off* non è esatta: più correttamente si dovrebbe parlare disassamento tra cordoni adiacenti.

4- Sviluppo software e hardware

4.1- Sviluppo software

Il software (si veda Figura 4.1) è stato sviluppato in ambiente grafico Windows per sfruttarne le potenzialità e la flessibilità per l'installazione, l'uso e la realizzazione di applicazioni.

In particolare è stata scelta una piattaforma a 32 bit per velocizzare le elaborazioni, considerando le elevate esigenze richieste dal trattamento di numerose immagini al secondo.

Nello sviluppo dell'applicazione si è cercato un compromesso tra:

- accedere con rapidità alle diverse funzioni per testare gli algoritmi;
- realizzare un prodotto che possa fungere da dimostratore delle prestazioni e dei risultati ottenuti con elaborazioni on-line.

Per fare questo, sono state sfruttate alcune librerie commerciali, per le funzioni di basso livello, in dotazione alla scheda, già ottimizzate per l'hardware e il software utilizzato.

Il programma presenta un'interfaccia general-purpose con vari strumenti necessari all'analisi e al pre-processing.

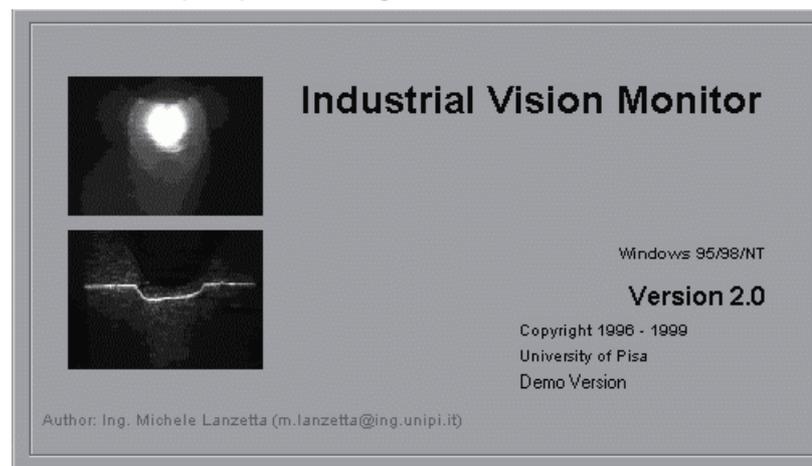


Figura 4.1: Finestra di apertura del programma di analisi visiva della saldatura

Tra le funzioni principali utilizzate vi sono:

- binarizzazione, windowing, determinazione della posizione corrente;
- istogrammi, profili orizzontali e verticali, il cui uso è descritto nel paragrafo sullo sviluppo degli algoritmi;
- applicazione di maschere di convoluzione per l'esaltazione e l'estrazione di contorni, omnidirezionali o con direzioni preferenziali;
- operazioni morfologiche come erosioni, dilatazioni, thinning/skeleton, eseguite sia in binario che sui livelli di grigio;
- funzioni per la gestione dei buffer di memoria in maniera flessibile al fine di visualizzare l'immagine originale o quella elaborata. Ciò è possibile sia in fase di test degli algoritmi, sia in esecuzione, quindi mascherando o

mettendo in primo piano i risultati dell'elaborazione rispetto alle immagini acquisite non modificate.

4.2- Programma per il controllo di saldature

On-line welding control (si veda Figura 4.2) è il menu principale delle funzioni relative all'analisi delle immagini della saldatura.

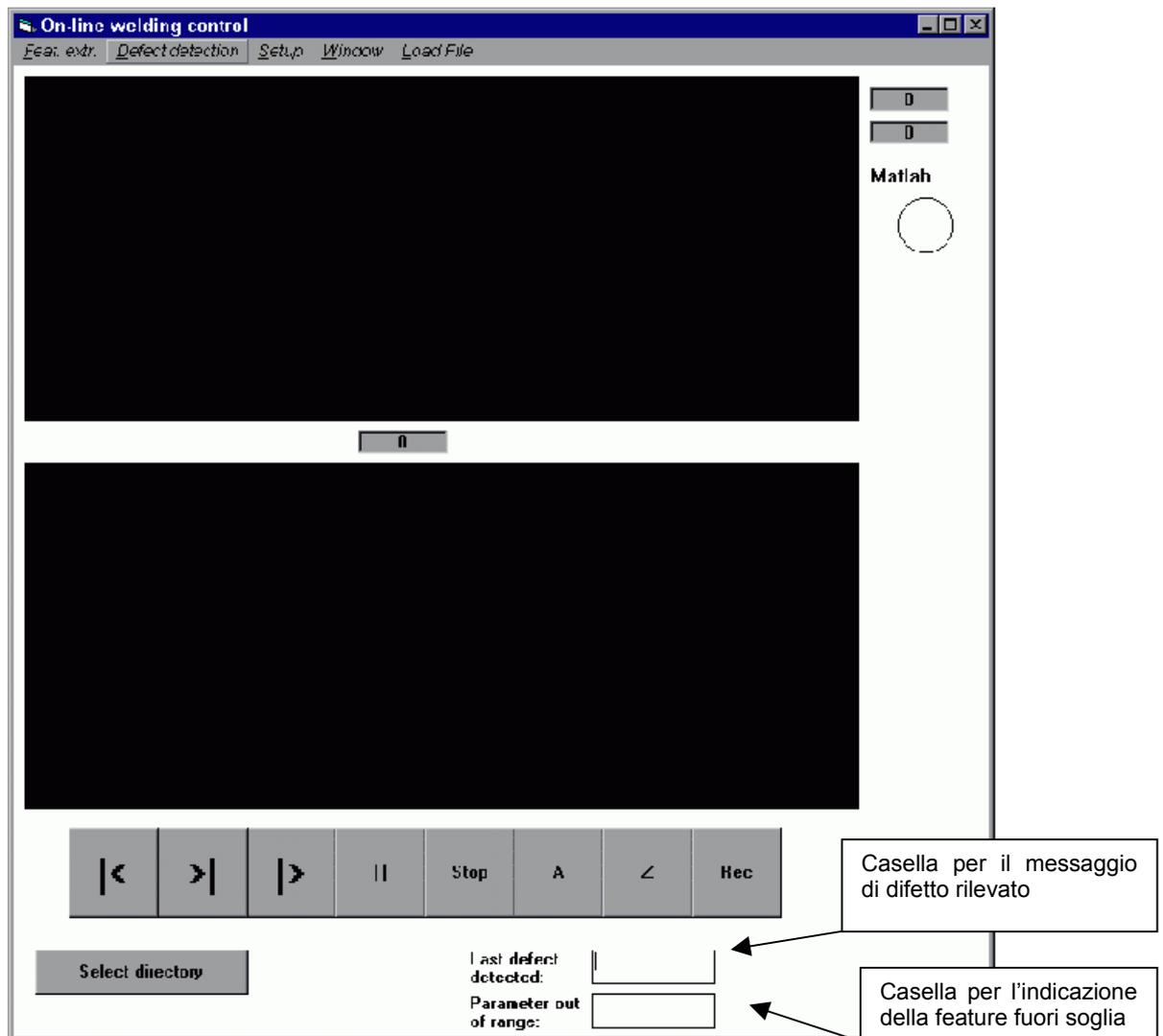


Figura 4.2: Finestra principale del programma *On-line welding control*

Contiene le funzioni per acquisizione, registrazione (tasto 'Rec' della finestra *On line welding control*, Figura 4.2) e riproduzione delle immagini (tasto *play*, '>|', Figura 4.2) e per l'estrazione di feature della pozza e del cordone per il riconoscimento dei difetti; altri tasti controllano l'avanzamento delle immagini durante la visualizzazione e il controllo:

- tasto di avanzamento singolo ('>|'), che consente di procedere nella visualizzazione ed elaborazione di una singola immagine o coppia di immagini (*hot* e *cold*) alla volta, mentre l'esecuzione del programma di

controllo si trova in modalità di pausa (tasto '|') o dopo che è stato arrestato (tasto 'Stop');

- tasto di avanzamento singolo all'indietro ('|<'), che consente di procedere nella visualizzazione ed elaborazione di una singola immagine o coppia di immagini (*hot* e *cold*) alla volta, con indice decrescente all'interno di una sequenza di saldatura; il comando funziona nelle stesse modalità di esecuzione del programma descritte al punto precedente;
- tasto 'A': consente di impostare il numero d'ordine dell'immagine nella sequenza di saldatura in esame dalla quale far partire l'algoritmo di visualizzazione e controllo. Si può utilizzare per limitare l'analisi ad un intervallo della sequenza di saldatura: per esempio, per evitare di compiere l'analisi sulle immagini relative al primo tratto del cordone, che sono generalmente più disturbate e non sono significative per il controllo in quanto ancora non corrispondono al raggiungimento delle condizioni di regime del processo;
- tasto 'Z': consente di impostare il numero d'ordine dell'immagine nella sequenza di saldatura in esame sulla quale far terminare l'esecuzione dell'algoritmo di visualizzazione e controllo.

Il tasto '*Matlab*' attiva il dialogo del programma di controllo '*On-line welding control*' con il programma omonimo, tramite ActiveX, per consentire la visualizzazione delle feature calcolate su grafici in ambiente Matlab e l'esecuzione di alcune elaborazioni dei dati estratti con algoritmi sviluppati in codice Matlab (si veda paragrafo 4.7 su comunicazione VB-Matlab).

Infine, nella finestra principale del programma compaiono due messaggi sul risultato del controllo (*Last defect detected* e *Parameter out of range*), che descrivono la denominazione del difetto individuato in caso di saldatura non corretta e il parametro di processo da modificare per l'intervento del sistema correttivo (si veda il Capitolo 8. *Strategia del controllo*).

Al termine dell'elaborazione su un intervallo di immagini di una sequenza di saldatura, i dati estratti vengono salvati sotto forma di file di testo oppure come file eseguibili o di dati in Matlab (*.m' o *.mat': si veda il paragrafo 4.7 comunicazione con matlab). Questi file rappresentano la documentazione sull'andamento delle diverse feature durante il processo che può corredare la saldatura a scopo certificazione.

È possibile attivare le funzioni di controllo della saldatura e di salvataggio dei dati delle feature estratte selezionando i pulsanti relativi nella finestra di opzioni del programma principale *Ivision* (si veda Figura 4.3): in questo caso, contemporaneamente all'acquisizione e memorizzazione delle immagini o alla loro riproduzione, per ogni frame della pozza o del cordone vengono applicati gli algoritmi di estrazione ed elaborazione per il calcolo dei dati delle feature.

Come si osserva nella Figura 4.3, si possono attivare altre tre diverse opzioni:

1. trasmissione di dati (immagini) via TCP/IP (si veda il paragrafo 2.6 Comunicazione tra il sistema RTM e il sistema Qualital);
2. registrazione di file in formato *.cam (il programma funziona su immagini in formato *tif* per default), in cui vengono forniti i dati salvati mediante il software RTM (si veda il paragrafo 2.3 Descrizione dell'hardware RTM);

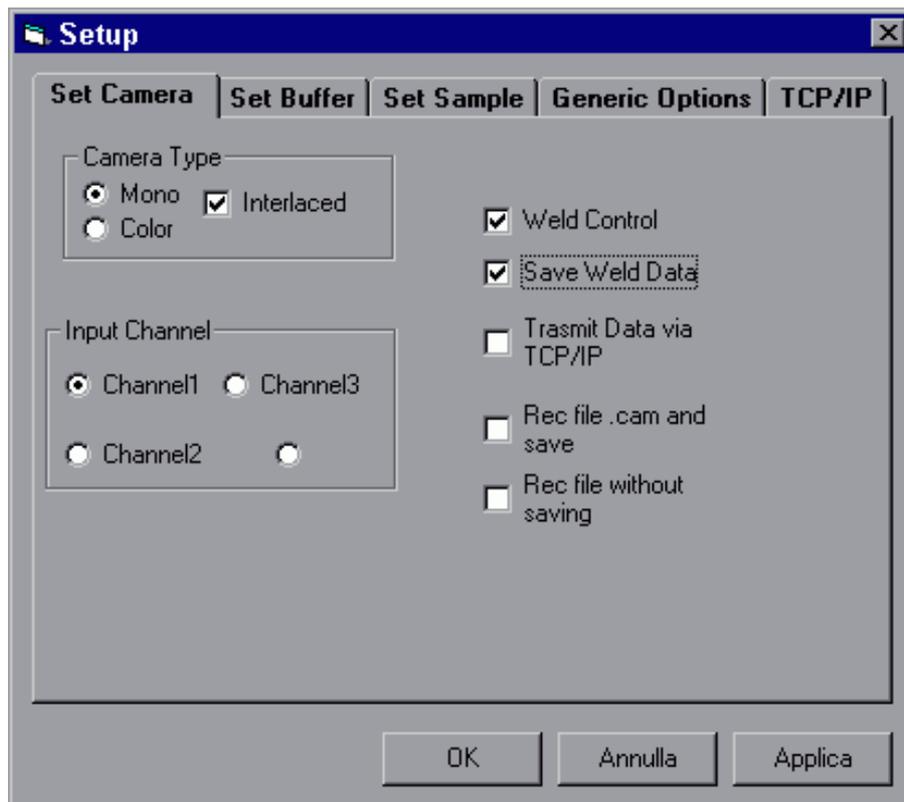


Figura 4.3: Finestra *Options* del programma principale *IVision*

3. acquisizione di immagini da telecamera e visualizzazione su display senza salvataggio su disco (per default il programma memorizza su hard disk le immagini registrate nelle sottocartelle contenute in una cartella principale scelta dall'operatore).

E' possibile stabilire, come input sia per l'acquisizione che per la riproduzione, le telecamere (tasto *Rec*) oppure immagini precedentemente salvate su hard disk o da CD-ROM: in questo caso si può selezionare la cartella di origine delle immagini mediante il tasto *Select directory* (Figura 4.2); l'unica limitazione per la corretta esecuzione del comando è che la cartella scelta contenga due sottocartelle '*hot*' e '*cold*', cioè quelle in cui il programma cerca le immagini da visualizzare per la pozza e per il cordone.

Le immagini di saldatura vengono visualizzate sui due display della finestra di Figura 4.2; normalmente la visualizzazione utilizza il display superiore per le immagini della pozza e quello inferiore per le immagini del profilo laser.

Solo dopo che l'operatore abbia scelto la cartella di origine delle immagini da elaborare, compaiono altre due finestre (si vedano Figura 4.4 e Figura 4.5) che visualizzano e controllano i valori calcolati delle feature estratte per la pozza e per il cordone: per una descrizione del significato dei valori estratti e visualizzati nelle due finestre si vedano i Capitoli 5. *Algoritmi di estrazione delle feature della pozza*, 6. *Algoritmi di estrazione delle feature del cordone* e 7. *Strategia del controllo*.

Il passo successivo consiste nell'elaborazione ed estrazione delle feature della pozza e del profilo laser.

4.3- Elaborazione ed estrazione delle feature

L'elaborazione delle immagini consiste in tre passi fondamentali:

1. *pre-processing*, che consiste nella sequenza di operazioni di manipolazione che precede e facilita (o semplicemente rende possibile) il passo di estrazione della pozza o della linea del profilo dalle immagini acquisite ;
2. estrazione della pozza o della linea del profilo del cordone;
3. calcolo, scrittura e salvataggio delle feature utili per il controllo.

Il passo 1 è diverso a seconda della tipologia di saldatura e delle caratteristiche delle immagini acquisite: per esempio è diverso il trattamento eseguito sulle quelle registrate con il sensore RTM e quelle registrate con il sensore Qualital (si vedano i Capitoli 3. *Prove*, 5. *Algoritmi per il caldo* e 6. *Algoritmi per il freddo*). Riportate le immagini delle sequenze a condizioni e caratteristiche standard, si compie il passo 2, che è lo stesso quale che sia la tipologia di saldatura di riferimento e le modalità di acquisizione (si vedano i Capitoli 5. *Algoritmi per il caldo* e 6. *Algoritmi per il freddo*). Infine, il passo 3 dipende esclusivamente dalla tipologia di saldatura di interesse (si veda il paragrafo 3.x- *Tipologia di saldatura:placcatura*).

Features	Actual	Min.	Max.	Avg.	Plot
Pool area	0	100000	0	0	<input type="checkbox"/>
Pool perim.	0	100000	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Pool width	0	1000	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Pool height	0	1000	0	0	<input type="checkbox"/>
Wire length [pixel]	0	100	0	0	<input type="checkbox"/>
Sparks	0	2	0	0	<input type="checkbox"/>
Smoke [%]	0				<input checked="" type="checkbox"/> Fixed background thr.
Arc stability [warning #]	0				<input type="checkbox"/> Only cold
Arc Treshold	150				<input type="checkbox"/> Don't show features
Arc Area	0	4			
Background Mode	0	255	0	0	<input type="checkbox"/>
Background Mean	0	255	0	0	<input type="checkbox"/>

Measur. value [%]: N. A.

Min. accept. value [%]: .3

Max. accept. value [%]: .7

Reset

Figura 4.4: *Hot-pool features*: finestra di visualizzazione e controllo delle feature estratte dall'immagine della pozza

Nella finestra per l'analisi della pozza (si veda Figura 4.4) vengono plottate in tempo reale le feature prescelte che sono trattate nel Capitolo specifico

(Capitolo 5). Viene rappresentato il valore attuale (*Actual*), il massimo (*Max*) e il minimo (*Min*) riscontrati nella sequenza e il valore medio di riferimento (*Avg*).

Nella finestra delle feature relative al giunto freddo (si veda Figura 4.5) vengono plottati i valore corrente di ciascuna feature (*Measur. Value*) e il range di accettabilità (*Min. Accept. Value – Max. Accept. Value*). '*Min. Accept. Value*' e '*Max. Accept. Value*' si illuminano di rosso nel caso in cui '*Measur. Value*' sia un valore esterno all'intervallo da essi delimitato: ciò corrisponde ad un messaggio di allarme del programma di controllo. Accanto all'indicazione del minimo e massimo valore accettabile della feature, è indicato il massimo numero di volte consecutive per cui si ammette il superamento di una delle due soglie (può infatti verificarsi un valore di feature fuori soglia a causa di un errore isolato dell'algoritmo di estrazione o di misura delle feature); quando ciò si verifica, anche questa casella si colora di rosso: si tratta di un messaggio di errore del programma di controllo. Siamo allora sicuri che il valore della feature è tendenzialmente fuori dell'intervallo di accettabilità.

Features	Min. accept. value		Max. accept. value		Measur. value	Plot
Area	2720	8	3253	8	0	<input checked="" type="checkbox"/>
Spatters/Poros.	0	0	10	12	0	<input type="checkbox"/>
Joint Width	80	8	250	10	0	<input type="checkbox"/>
Joint Height	20	6	30	4	0	<input type="checkbox"/>
Profile regularity	3	10	7	10	0	<input type="checkbox"/>

Disjunction False

1* Ref. X 0 Referen. Distance 0 Ref. width 75

1* Ref. Y 0 Referen. Angle 0 Ref. height 81

Pos. Var. 0 Referen.X Distance 0 Ref Pos. X 70

Width 1* Ref. 0 Referen.Y Distance 0 Ref Pos. X 70

Angle 1* Ref. 0 Ref. Eq. Slope 0 ROI pos. X -40

Length 1* Ref. 0 Ref. Eq. Y int. 0 ROI pos. Y -35

Line Slope 1* 0 Referen.Y Distance 0 ROI end X 240

Y int. 1* Ref. 0 Referen.Y Distance 0 ROI end Y 5

Don't show features Only Hot Matlab Control

Don't Plot Profile Don't Preprocess

Use smaller window

Left to Right Right to Left

Figura 4.5: *Cold-joint features*: finestra di visualizzazione e controllo delle feature estratte dall'immagine del profilo laser

Nelle finestre delle feature è possibile attivare alcune opzioni di visualizzazione:

- *Don't show features*, che disattiva l'operazione di scrittura delle feature calcolate nei relativi spazi all'interno delle finestre;
- *Don't plot profile*, nella finestra *Cold-joint features*, disattiva la visualizzazione della linea estratta dal profilo sovrapposta al profilo binarizzato presente sul display (si veda i paragrafi 6.4 e 6.5 sul preprocessing). L'opzione di visualizzazione è utile in fase di messa a punto e test del sistema per una verifica visiva della correttezza dell'estrazione: tuttavia l'operazione è dispendiosa in termini di tempo perché rappresenta un'elaborazione grafica aggiuntiva e diminuisce la frequenza di controllo sulle immagini;
- *Don't preprocess*, nella finestra *Cold-joint features*, disattiva la realizzazione dei passi di *pre-processing* dell'immagine della linea laser;
- *Only hot*, nella finestra *Cold-joint features*, consente elaborazione ed estrazione delle feature delle sole immagini della pozza; in questo caso i display visualizzano per ogni *frame* l'immagine originale della pozza e l'immagine binarizzata, rispettivamente;
- *Only cold*, nella finestra *Hot-pool features*, consente elaborazione ed estrazione delle feature delle sole immagini del profilo del cordone; in questo caso i display visualizzano per ogni *frame* l'immagine originale della linea laser e il profilo estratto, risultato del *pre-processing*.

I valori di accettazione derivano dall'analisi sperimentale e possono essere inseriti e modificati direttamente dall'utente oppure calcolati dal programma stesso durante una fase iniziale di *training* di funzionamento (si veda il Capitolo 8. *Strategia di controllo*): in questa fase, il programma viene testato su un cordone di saldatura di caratteristiche ottimali (durante il *training* il processo di saldatura deve essere seguito da un tecnico specializzato che sia in grado di certificarne la correttezza). Dai dati estratti sulle feature della pozza e del cordone, mediante opportune operazioni statistiche di media e calcolo di errore (si veda il Capitolo 8. *Strategia del controllo*), forniscono i limiti di accettabilità suddetti.

Un'altra fase di impostazione dei parametri del sistema è costituita dalla calibrazione geometrica, ovvero la determinazione delle corrispondenze tra unità di misura all'interno delle immagini e grandezze geometriche reali (si veda il paragrafo successivo,

4.4- Calibrazione del sistema

Per la determinazione della dimensione reale corrispondente all'immagine di un certo profilo del giunto freddo è necessario eseguire la calibrazione del sistema.

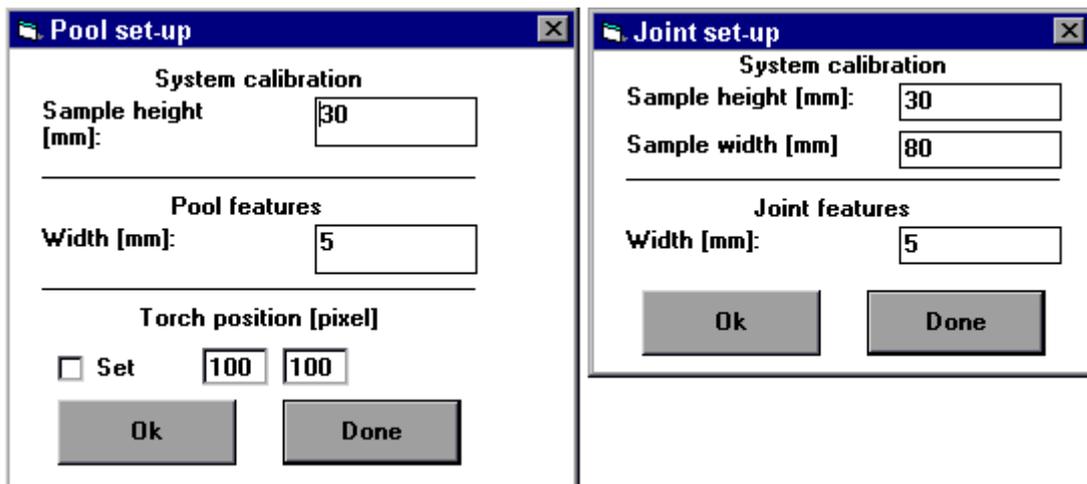


Figura 4.6: Finestre del programma di controllo per la calibrazione geometrica del sistema

Attraverso la finestra «Joint Setup» (si veda Figura 4.6) è possibile impostare i parametri necessari. E' previsto di utilizzare la lama laser come metodo di rilevazione. Si utilizza un campione noto di cui vengono impostate le dimensioni reali e la corrispondente dimensione su video. Viene così determinato un unico coefficiente che tiene conto sia del rapporto mm/pixel, sia dell'inclinazione della telecamera e del laser. Viene trascurata la distorsione ottica il cui ordine di grandezza nella parte centrale dell'immagine in cui viene osservato il giunto è inferiore al massimo errore accettabile. In uscita dal programma è quindi possibile avere le grandezze in pixel o in mm.

La procedura per la calibrazione delle immagini relative alla parte calda è concettualmente analoga alla precedente. Anche in questo caso viene determinato un unico coefficiente valido per determinare il rapporto di conversione mm/pixel.

Attraverso questa finestra di dialogo è anche possibile impostare la posizione di uscita del filo dalla torcia con un doppio click del mouse. Questa operazione viene eseguita una sola volta dopo avere posizionato torcia e telecamere, considerando che per tutta la sequenza osservata rimarranno solidali e permette di rilevare la lunghezza effettiva del filo in pixel e successivamente convertirla in mm.

4.5- Alcune problematiche affrontate nello sviluppo del software

4.5.1- Modalità interlacciato e non

La frequenza di acquisizione dipende dalla modalità che può essere in interlacciato oppure in non-interlacciato. Nel caso dell'interlacciato, la frequenza di acquisizione è quella prevista dallo standard CCIR delle telecamere utilizzate, pari a 50 Hz. Tuttavia sono registrati alternativamente dei quadri con righe pari e dispari, quindi, data l'elevata rapidità del fenomeno, l'immagine risultante è scorretta, e ciò può essere osservato dall'alternanza di righe

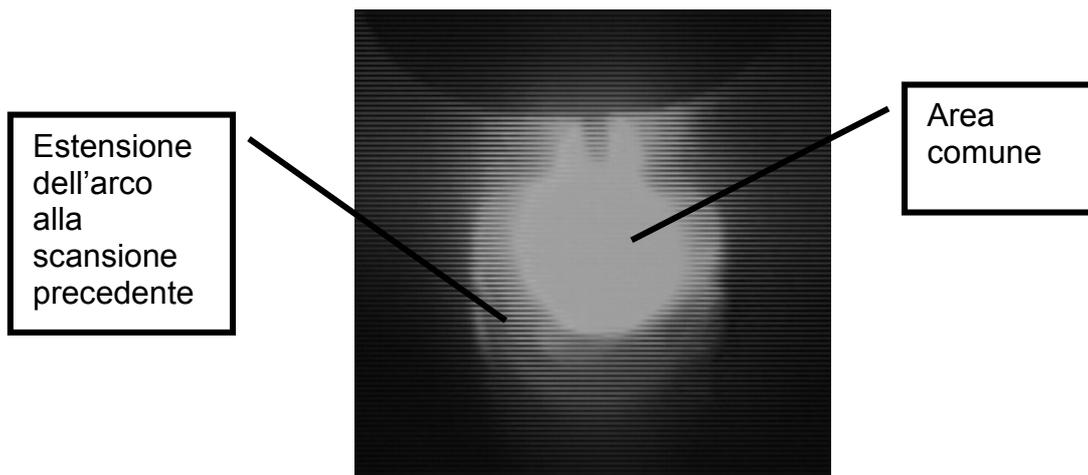


Figura 4.7: Immagine con righe acquisita in modalità interlacciata.

discontinue nell'immagine. In Figura 4.7, si nota ad esempio che la repentina riduzione della zona dell'arco ha dato come risultato la presenza di righe chiare e scure alternate. Viceversa, nella parte centrale comune, in cui l'arco è presente nelle due scansioni del quadro la luminosità è continua.

Per superare questo problema, sulle immagini già disponibili viene eseguita un'operazione di filtraggio morfologico (in Figura 4.8 è riportato il kernel utilizzato) attraverso una dilatazione della zona chiara di passo uno. Maggiori dettagli sull'argomento sono disponibili in letteratura, ad esempio in [2].

DILATAZIONE

1	1	1
1	0	1
1	1	1

Figura 4.8: Kernel per l'operazione morfologica.

Quest'operazione è stata implementata anche nella fase on-line in tempo reale. Le immagini ottenute risultano di buona qualità e questo tipo di filtraggio risolve numerosi problemi legati alla blob analysis dovuti alla discontinuità. L'inconveniente principale è che si rischia di sovradimensionare le grandezze in quanto concettualmente viene eseguita una somma delle dimensioni dell'arco in due istanti successivi.

Per risolvere questo problema è stata implementata l'acquisizione in modalità non-interlacciata. In questa situazione la quantità di informazioni è la stessa che in quella precedente, perché dipende dalla capacità della scheda di digitalizzazione. Pertanto all'acquisizione di un quadro completo corrisponde una riduzione del numero di righe che passa da 576 a 288, alla frequenza effettiva di 50 Hz.

[2] Baxes, G. A.: Digital Image Processing - A Practical Primer, Cascade Press, 1994

L'effetto visivo risultante è una riduzione verticale dell'immagine. Per consentire una corretta visione, viene utilizzata una funzione di zoom che riporta i lati dell'immagine in scala da 1:2 a 1:1.

4.5.2- Acquisizione e visualizzazione di sequenze

Per l'archiviazione dei dati onde consentire un'analisi off-line è stato necessario implementare una funzione di memorizzazione su disco delle immagini acquisite.

Sono state seguite due strade:

1. nel primo approccio le immagini vengono mantenute in memoria fino al termine della prova e successivamente memorizzate su hard disk;
2. nel secondo l'immagine viene acquisita e salvata immediatamente su hard disk.

Il primo metodo consente di raggiungere la massima frequenza di acquisizione e memorizzazione, cioè quella effettiva di 50 Hz, ma è limitato dalla RAM disponibile. In pratica, considerando che ogni immagine occupa circa 175 KByte (il doppio nel caso di interlacciato), per 1 secondo di acquisizione sono necessari $50 \times 175\text{KByte}$, cioè quasi 10 MByte. Bisogna inoltre tenere conto che, in PC dotati di molta RAM, il sistema operativo Windows non fa una gestione efficiente della memoria arrivando ad occuparne fino a circa 40 su 128 in configurazione standard. Con opportune azioni (forzando le dimensioni dello stack), controllando accuratamente il caricamento di driver all'avvio e se non vengono eseguite altre applicazioni prima dell'acquisizione, lo spazio occupato dal solo sistema operativo e non utilizzabile per le immagini si può ridurre fino a 15 MByte. Se si eccede la quantità di memoria necessaria prolungando l'acquisizione delle immagini in RAM, il sistema attiva una procedura di swap su disco che rallenta l'acquisizione ad una frequenza variabile e non prevedibile. In conclusione, con il sistema utilizzato è stato possibile testare il massimo frame rate acquisendo e memorizzando sequenze di 150 immagini. Tali sequenze sono state utilizzate per valutare la frequenza ottimale di acquisizione.

Con il secondo metodo si raggiunge un frame rate di 6-8 Hz. Da un'analisi approfondita dei tempi di acquisizione si è notato che questi non hanno un andamento costante, in particolare vengono memorizzate più immagini all'inizio dell'acquisizione e poi si assiste ad un rallentamento e a successive fluttuazioni, con un minimo di 4 Hz.

Questi tempi dipendono dalla modalità di gestione del salvataggio da parte del sistema operativo e sono stati superati facendo uso di un temporizzatore che impone la frequenza di acquisizione, attestandola naturalmente al livello più basso.

Da un'analisi delle immagini ricavate, dettagliata nel capitolo relativo alle prove sperimentali, si è potuto concludere che la frequenza fissa di 4 Hz è un buon compromesso tra quantità di informazioni acquisite rispetto alla variabilità del fenomeno e la capacità di elaborarle ed è stata utilizzata nel programma.

Per completezza è stata implementata anche la funzione di visualizzazione di sequenze di immagini con varie opzioni: accelerata alla massima frequenza possibile (variabile), a frequenza fissa e alla stessa frequenza con cui sono state registrate. In quest'ultimo caso ciò è possibile avendo memorizzato anche i tempi di acquisizione.

Nella visualizzazione, viene aggiunto il nome dell'immagine corrente e i parametri nominali della saldatura registrati.

4.5.3- Scelta della frequenza di acquisizione

E' stato osservato che la frequenza di 50 Hz per l'acquisizione non è sufficiente per la rapidità di fluttuazione del fenomeno, quindi l'otturatore elettronico è stato posto al massimo livello disponibile con le telecamere impiegate, pari a 1/10000 s.

Da un'analisi delle immagini ricavate da sequenze diverse, facendo variare la frequenza di acquisizione, come dettagliato nel capitolo relativo allo sviluppo del software, si è potuto concludere che la frequenza fissa di 4 Hz è un buon compromesso tra quantità di informazioni acquisite rispetto alla variabilità del fenomeno e la capacità di elaborarle ed è stata utilizzata nel programma.

Si è osservato che la quantità aggiuntiva di informazioni ottenibile non è necessaria per la migliore comprensione e descrizione del fenomeno, per i seguenti motivi:

1. E' noto, che nelle modalità short e spray arc il distacco delle gocce ha una frequenza di circa 20 Hz, quindi non è possibile osservarne l'andamento se non con acquisizioni con telecamere particolari ad alta frequenza.
2. Analogamente è stato osservato che le fluttuazioni dell'arco hanno frequenza maggiore di 50 HZ.
3. Per quanto riguarda invece i transitori, le grandezze variano in tempi dell'ordine del secondo.

La maggiore frequenza di acquisizione viene sfruttata per ridondanza al fine di disporre di dati più numerosi da mediare.

4.6- Comunicazione del programma sviluppato in Visual Basic con Matlab

In aggiunta al programma per il controllo on-line della saldatura, è stata sviluppata l'analisi dei profili del cordone in ambiente Matlab, per sfruttare la maggiore disponibilità di funzioni matematiche per la fase di test trattata in dettaglio nel capitolo relativo (Capitolo 6).

Per la fase d'integrazione del sistema è stata realizzata l'implementazione degli algoritmi suddetti (il cui codice è riportato in Appendice C) nel programma precedentemente descritto, ovvero nel software dimostratore.

Il programma Matlab viene automaticamente aperto ogni volta che il programma di controllo della saldatura viene avviato su una sequenza, sia in modalità on-line (fase di registrazione delle immagini) che in modalità off-line (elaborazione di immagini già registrate).

Per ogni immagine, che viene registrata o caricata da disco, al termine della fase di pre-processing ed estrazione del profilo (si veda il Capitolo 6), la relativa matrice 'iProfile' viene passata dal programma in Visual Basic allo spazio di lavoro di Matlab. Essa risulta visibile come variabile sulla quale operare elaborazioni e misure delle feature ricercate per il controllo.

Al termine del calcolo, le feature misurate vengono restituite al programma Visual Basic come variabili.

La comunicaizone è realizzata tramite ActiveX.

Ciò è risultato vantaggioso, in quanto ha evitato la necessità di tradurre le più complesse funzioni di calcolo di Matlab in sequenze di comandi elementari di Visual Basic; inoltre, i tempi relativi al calcolo e allo scambio di risultati non risultano onerosi.

5- Algoritmi di elaborazione delle immagini: analisi della pozza fusa

I moduli di elaborazione delle immagini sono raggruppabili in tre insiemi, sulla base delle loro funzioni:

1. algoritmi di autocalibrazione per la misura delle dimensioni della regione di saldatura;
2. algoritmi per l'estrazione delle *feature* dall'immagine della pozza di saldatura;
3. algoritmi per l'estrazione delle *feature* dall'immagine del profilo del cordone.

In questo capitolo si descrivono gli algoritmi sviluppati per l'analisi della pozza di saldatura. Nel seguente Capitolo 6 si trattano gli algoritmi sviluppati per l'analisi della linea laser proiettata sul giunto saldato.

Il software sviluppato consente di registrare una serie di parametri per caratterizzare le immagini del giunto durante la saldatura.

Il principale problema nell'analisi di queste immagini, che risulta molto innovativa rispetto alla bibliografia disponibile, è l'estrazione di informazioni (*feature*) per i seguenti problemi:

- elevata quantità di disturbi, causati dalla luminosità dell'arco che risulta nettamente superiore a quella dello sfondo e del cordone incandescente;
- rapida variabilità del fenomeno, dovuta all'instabilità dell'arco che cambia continuamente forma con escursioni elevate.

Per i problemi indicati, un aspetto critico di quest'analisi è stata la scelta di algoritmi efficienti, e sufficientemente veloci per operare on-line, al fine di estrarre *feature* significative. Nel paragrafo successivo sono riportati i risultati dell'analisi.

Successivamente vengono indicate le informazioni che è possibile estrarre dalle immagini, scaturite da interviste ai partner industriali e dall'osservazione diretta. Infine vengono riportati i principali risultati di tale analisi.

5.1- Algoritmi di autocalibrazione del sistema

Il controllo del processo di saldatura tramite visione artificiale richiede la misura di alcune caratteristiche geometriche della bagno di metallo fuso e del profilo del cordone: perciò è necessario stabilire una correlazione tra dimensioni dell'immagine (in *pixel*) e dimensioni reali (in mm).

Allo scopo si usano alcuni algoritmi classici per calibrazione delle immagini.

5.2- Algoritmi per l'estrazione di feature dall'immagine della pozza di saldatura

Nelle immagini acquisite come descritto in precedenza si distinguono:

1. uno sfondo molto scuro (livello di luminosità prossimo a zero);
2. la pozza di saldatura con il metallo incandescente (livello di luminosità superiore a $29 \div 35$);
3. l'arco, che appare come una macchia brillante (livello di luminosità prossimo o pari a 256: l'elevata intensità della luce dell'arco provoca la saturazione della sensibilità della telecamera).

Si riporta una delle immagini acquisite durante una prova di saldatura in modalità spray-arc (Figura 5.1).

Lo strumento più adatto all'elaborazione di questo genere di immagine è l'operazione di **binarizzazione**

5.2.1- La binarizzazione: definizione del livello di soglia

L'operazione di binarizzazione di un'immagine in bianco e nero digitalizzata, consiste nella trasformazione dei livelli di luminosità di tutti i pixel dell'immagine: essi vengono convertiti al valore massimo (256, bianco) o al minimo (zero, nero) a seconda che la loro luminosità sia superiore o inferiore a

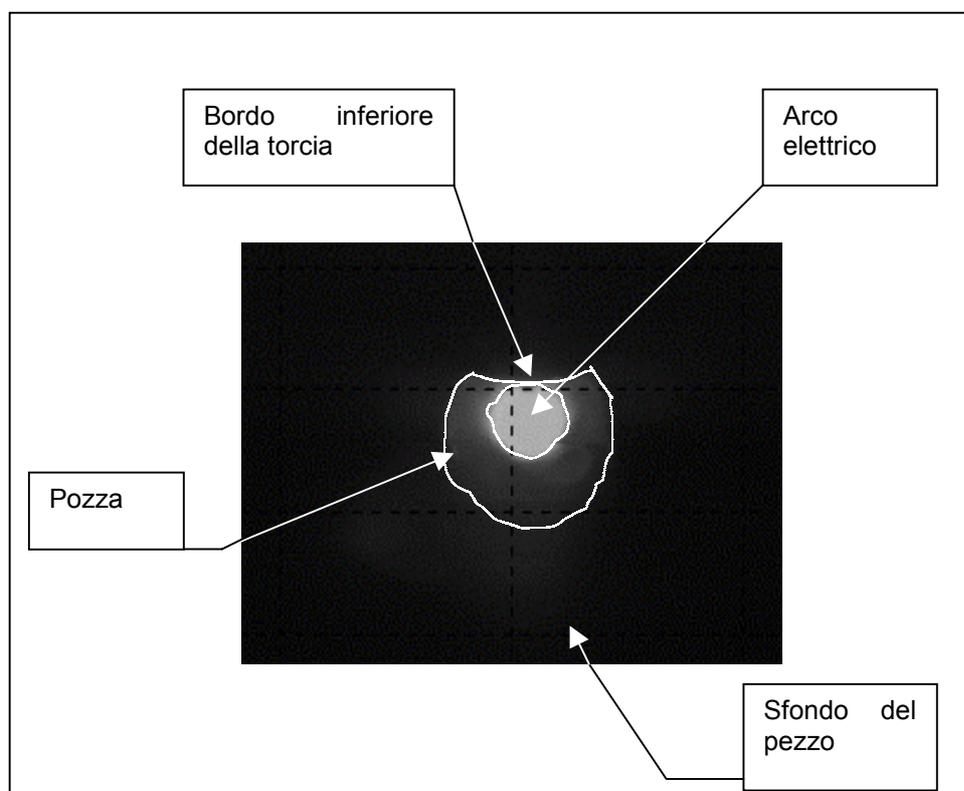


Figura 5.1: Immagine della pozza di saldatura; risoluzione pari a 580x756 pixel ($V = 28V$, $I = 250A$, $v = 290 \text{ mm/min}$)

un dato livello di riferimento (*soglia di binarizzazione*).

Sono adatte all'elaborazione tramite binarizzazione le immagini che presentano un istogramma dei livelli di grigio di tipo bimodale, ovvero con almeno due picchi in corrispondenza di due diversi valori di luminosità. Scegliendo un valore intermedio tra essi come soglia di binarizzazione, si riesce a separare i due oggetti dell'immagine di diversa intensità luminosa.

Tuttavia, comunemente nelle immagini la separazione tra due oggetti di diverso livello di luminosità non è netta, ma passa attraverso tutta una scala di grigi: allora è importante realizzare una scelta accurata della soglia di binarizzazione per individuare correttamente i confini delle entità che devono essere separate.

Nel caso delle immagini della pozza di saldatura, si osserva una transizione graduale dalla zona chiara, rappresentante il bagno di metallo fuso, allo sfondo scuro: in questo caso, una scelta non adatta della soglia di binarizzazione può introdurre errori nell'individuazione dei confini della pozza. La conseguenza è che le dimensioni (larghezza, lunghezza, area) del bagno, possono essere sovrastimate o sottostimate.

Per la definizione del livello di soglia ottimale è necessario tracciare l'*istogramma dei livelli di grigio* dell'immagine: esso riporta in ascisse i livelli di grigio (da 0 a 255) e, in ordinate, la cumulata del numero di pixel dell'immagine del corrispondente livello di luminosità.

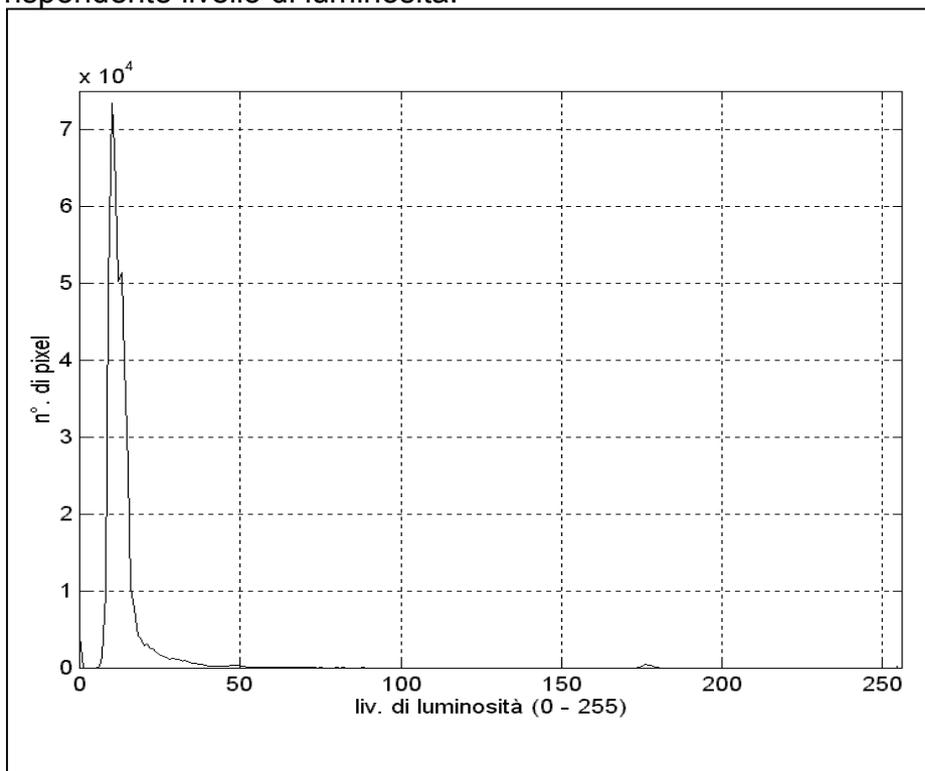


Figura 5.2a: Istogramma dei livelli di grigio dell'immagine della pozza di saldatura.

Si riporta un esempio di istogramma (Figure 5.2a e 5.2b), relativo all'immagine della pozza mostrata in Figura 5.1.

L'istogramma presenta due picchi, molto distaccati e di dimensioni molto diverse, rappresentanti i pixel della zona "pozza + arco" (picco di dimensioni minori, spostato verso più elevati valori di luminosità) e lo sfondo scuro. Si

potrebbe pensare di assumere un qualsiasi valore di luminosità intermedio tra i due picchi come livello di riferimento per la binarizzazione.

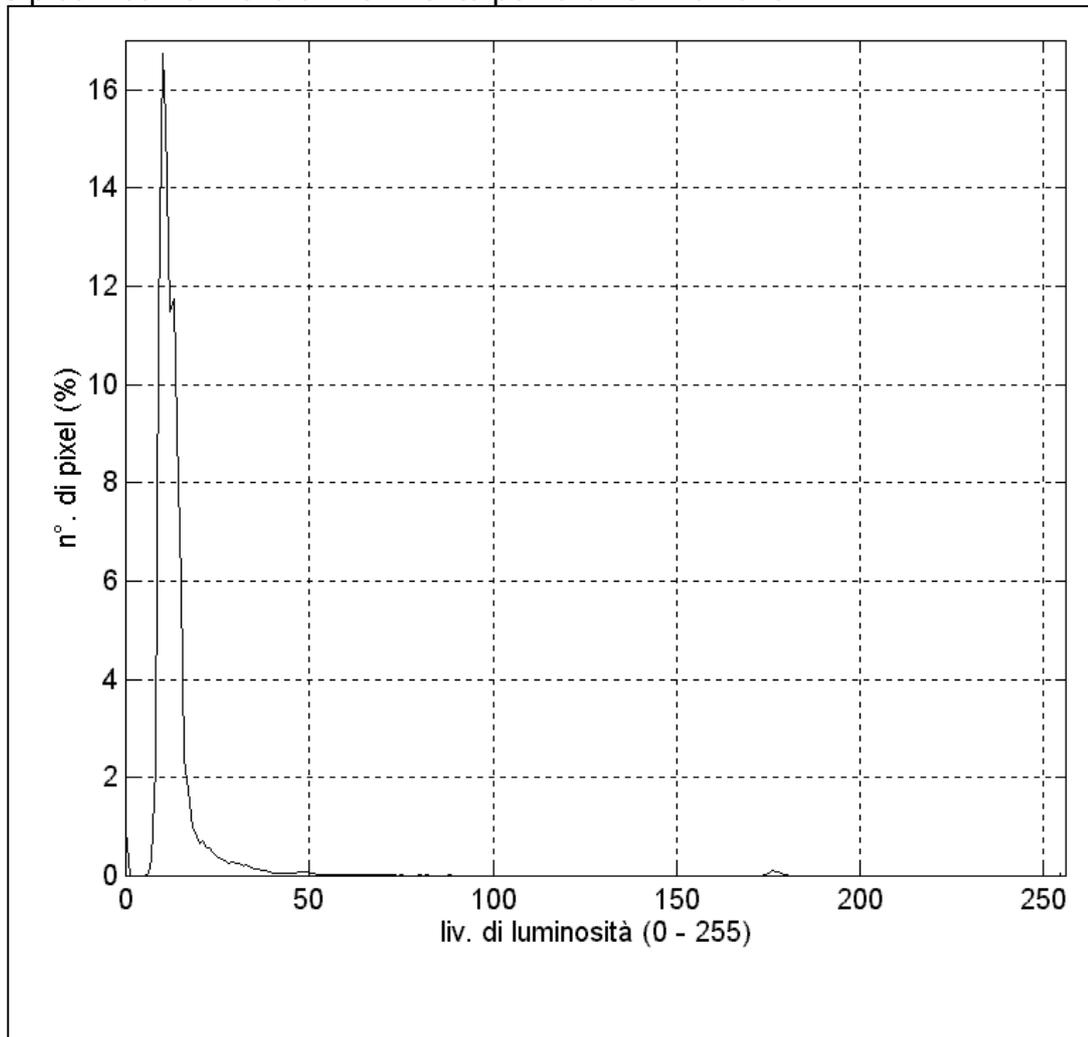


Figura 5.2b: Istogramma dei livelli di luminosità dell'immagine della pozza di saldatura (in ordinate si riporta la percentuale sul totale dei pixel dell'immagine: numero totale pari a 438480).

Tuttavia il picco relativo ai pixel più chiari è piuttosto slargato: ciò significa che nella zona più luminosa si ha una distribuzione non molto omogenea di livelli di grigio appartenenti all'intervallo rappresentato dalla base del picco (Figure 5.3a e 5.3b).

Altre curve utili per evidenziare la mancanza di una separazione netta in termini di luminosità tra la regione chiara e quella scura dell'immagine sono i *profili di luminosità* lungo le righe dell'immagine: il grafico riporta in ascisse l'indice dei pixel lungo una riga (da 0 a 756 nelle immagini di saldatura acquisite) e in ordinate il livello di luminosità corrispondente (da 0 a 256 livelli di grigio).

Si riporta a titolo di esempio un profilo di luminosità (Figure 20) relativo ad un'immagine della pozza.

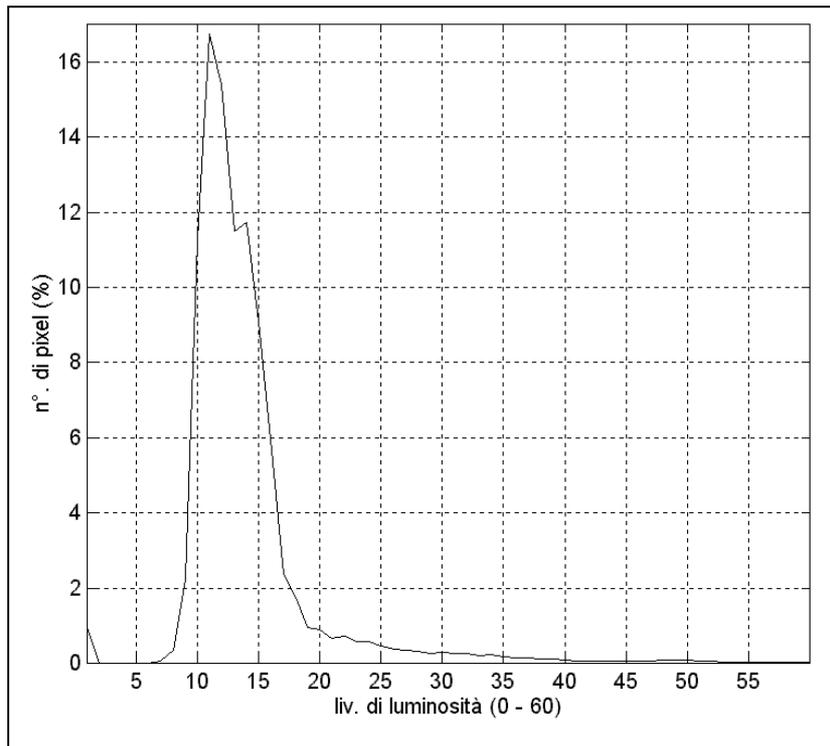


Figura 5.3a: Immagine del picco relativo alle zone scure dello sfondo dell'immagine della pozza (livelli di grigio 1 ÷ 60).

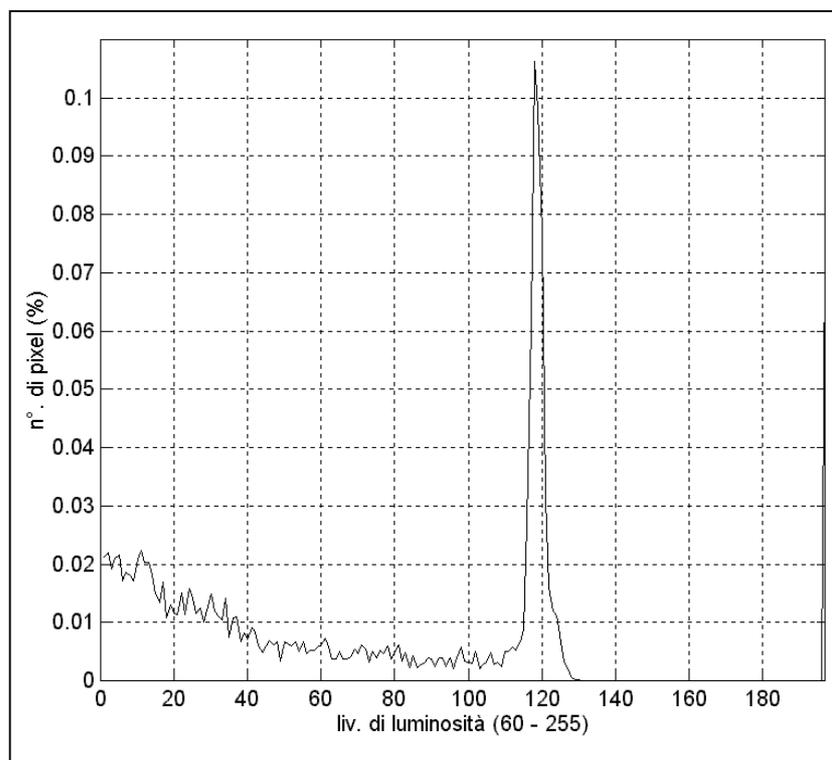


Figura 5.3b: Immagine del picco relativo alle zone più chiare dell'immagine della pozza (livelli di grigio 60 ÷ 255).

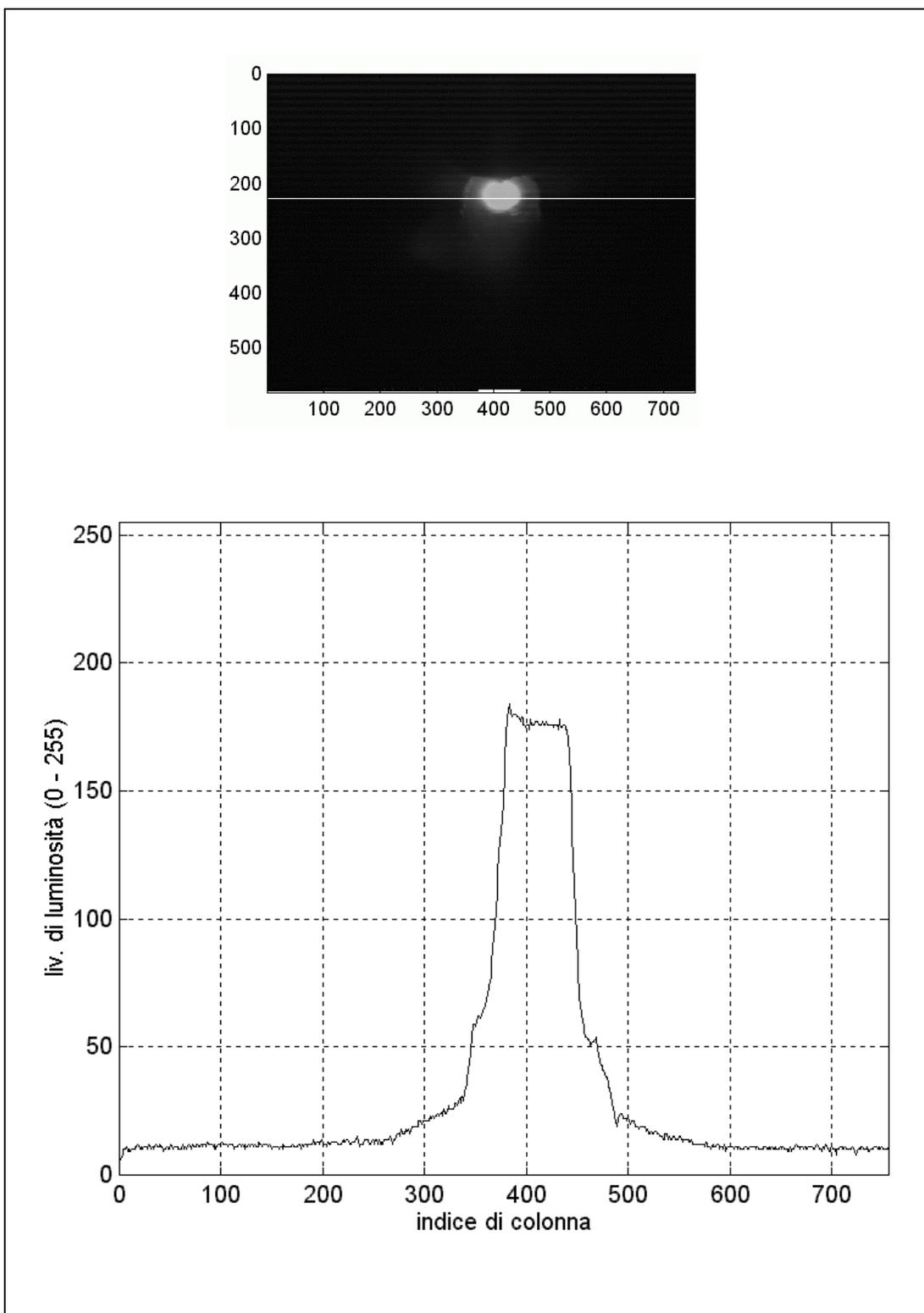


Figura 5.4: Profilo di luminosità della riga 175.

Sono state compiute prove di binarizzazione a diversi livelli di soglia (valori di luminosità variabili tra 24 e 35): i risultati ottenuti illustrano come varia l'area della zona bianca che dovrebbe rappresentare la pozza di saldatura. Dalla conoscenza delle caratteristiche dell'immagine originale portata come esempio, si può affermare che il valore ottimo della soglia è 34.

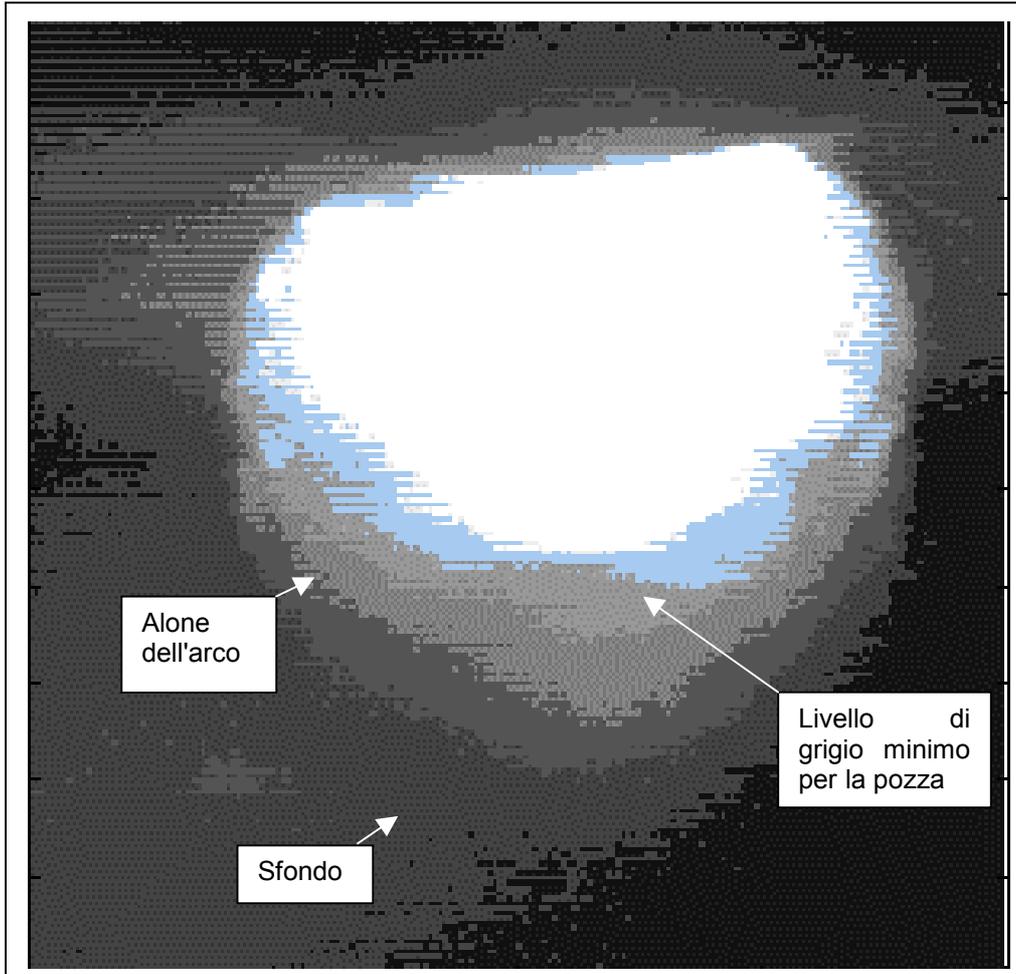


Figura 5.5: Immagine ingrandita della pozza di saldatura

L'andamento dei livelli di luminosità delle diverse regioni, individuabili nell'immagine della pozza, è evidenziato in Figura 5.5.

5.3- Algoritmi testati

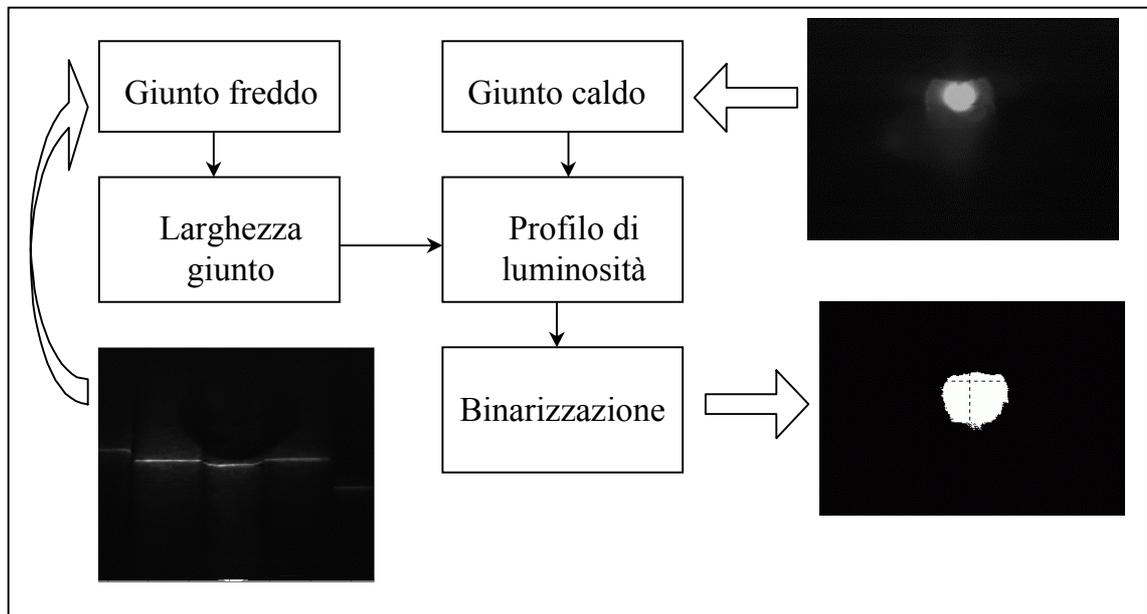


Figura 5.6: Schema dell'algoritmo di determinazione del confine del bagno di saldatura.

Il principale obiettivo degli algoritmi sviluppati è quello di isolare le zone relative al bagno o ad altri elementi (quali spruzzi o fumo) facendo una binarizzazione a soglia fissa per eseguire successivamente una blob analysis (cioè la misura delle aree ottenute); in Figura 5.6 è riportato lo schema seguito. Il problema principale è la determinazione del valore di soglia suddetto. I metodi sviluppati sono basati sui seguenti principi:

1. Viene individuata la soglia di binarizzazione in funzione della larghezza effettiva del giunto.
2. Con estrazione derivate. Il punto in cui si ha il massimo gradiente rispetto allo sfondo è in prossimità della pozza e la soglia di binarizzazione deve essere individuata in quella zona.
3. Con binarizzazione a valore predeterminato. Lo sfondo è molto più scuro ed uniforme del resto. Il valore viene preso come valore più frequente di un'area che contiene esclusivamente sfondo. In particolare viene eseguita la moda per annullare la presenza di rumore, eventuali spruzzi o altri disturbi nell'area esaminata.

5.3.1- Individuazione della soglia di binarizzazione in base alla larghezza dal giunto freddo

Il principio dell'algoritmo è schematizzato nelle Figure 5.8 e 5.9. Il principale inconveniente di questo metodo è che la larghezza della pozza è proporzionale ma non coincide con quella del cordone raffreddato, in quanto la

zona fusa si estende al metallo base. Pertanto l' algoritmo richiede notevoli sofisticazioni per risalire a tale soglia.

5.3.2- Analisi delle derivate

L' analisi dei gradienti viene effettuata attraverso una maschera di convoluzione. Il principale inconveniente di questa tecnica è che il gradiente lungo un profilo orizzontale è elevato anche in corrispondenza della transizione verso la zona di saturazione legata all' arco, perciò la determinazione della soglia di binarizzazione può risultare errata.

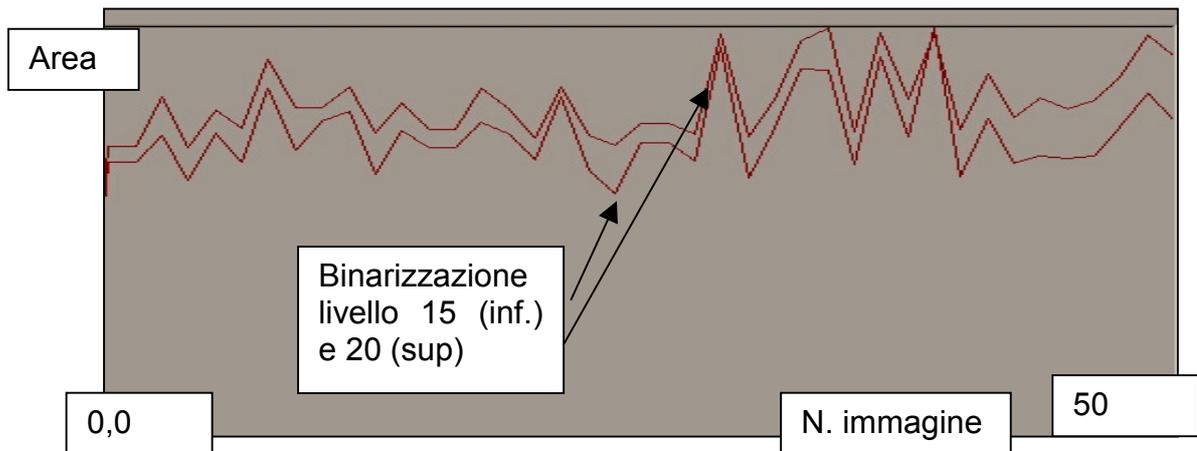


Figura 5.7: Prove di misura di area della pozza per una sequenza di saldatura a due diversi valori della soglia di binarizzazione (l' area è espressa in pixel dell' immagine).

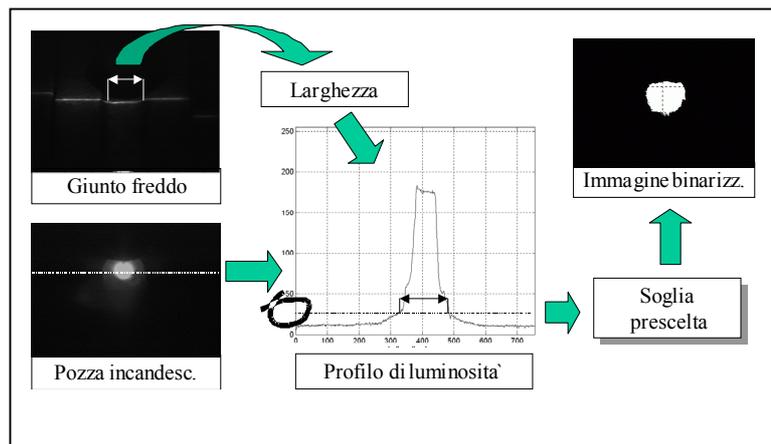


Figura 5.8: Principio di funzionamento dell' algoritmo d' individuazione della soglia di binarizzazione.

5.3.3- Metodo della soglia estratta dallo sfondo

E' il più semplice ed intuitivo. Per ottenere la pozza, basta eliminare lo sfondo che risulta nettamente più scuro e con poco rumore, considerando che, per attenuare la forte luminosità dell'arco, il diaframma e/o l'otturatore sono molto chiusi.

E' importante notare che un errore nella scelta della soglia comporta una traslazione dei valori, come mostrato in Figura 5.7. I valori normalizzati dell'area sono riportati a titolo d'esempio per mostrare che le variazioni relative sono simili. Il metodo si è dimostrato robusto per oscillazioni intorno alla soglia di ± 5 livelli, e permette di registrare correttamente l'andamento delle feature a meno di una costante additiva.

5.4- Scelta delle feature

Le caratteristiche geometriche della pozza possono essere misurate tramite le librerie MIL per elaborazione di immagini, disponibili con la scheda di acquisizione Matrox.

Le librerie permettono di realizzare alcune operazioni di *blob analysis* (dall'inglese *blob*, macchia); l'analisi di blob consiste nell'individuare il numero e le proprietà geometriche (area, perimetro, coordinate dei pixel estremi, centro di massa, assi d'inerzia, ecc.) delle diverse regioni omogenee in cui è suddivisa l'immagine binarizzata.

Le misure finora compiute sulle immagini della pozza sono le seguenti (i risultati sono tutti espressi in numero di pixel dell'immagine):

- misura di area;
- misura di perimetro, espresso in numero di pixel sul contorno del *blob*;
- misura della massima larghezza, espressa come differenza tra le ascisse di estremo (variabili *BoxXmin* e *BoxXmax*, nel programma di visione);
- misura della massima larghezza, espressa come differenza tra le ascisse di estremo (variabili *BoxXmin* e *BoxXmax*, nel programma di visione);
- misura della massima larghezza, espressa come differenza tra le ascisse dei pixel estremi (variabili *BoxXmin* e *BoxXmax*, nel programma di visione);
- misura della massima lunghezza, espressa come differenza tra le ordinate dei pixel estremi (variabili *BoxYmin* e *BoxYmax*, nel programma di visione).

In Tabella 5.1 si riportano i risultati numerici derivati dalla *blob analysis* di una delle immagini acquisite. In Figura 5.9 si riporta invece il risultato dell'analisi di un'intera sequenza. Naturalmente, i dati riportati in Tabella 5.1 e Figura 5.9 devono essere convertiti in unità di misura meccaniche (area in mm^2 e lunghezze in mm), applicando gli algoritmi di autocalibrazione.

Area	201 px ²
Perimetro	140 px
Larghezza massima	76 px
Lunghezza massima	5 px

Tabella 5.1: Risultati dell'elaborazione dell'immagine della pozza.

In letteratura è indicata l'esistenza di una correlazione tra la penetrazione e la forma e le dimensioni della pozza fusa.

La definizione di tale correlazione, richiede la raccolta di dati più dettagliati sull'andamento dei parametri della saldatura. In particolare si dovranno registrare insieme alle immagini anche i valori puntuali, acquisiti direttamente dalla saldatrice.

Oltre alla correlazione tra le dimensioni e la forma del bagno con i parametri del processo e con la penetrazione, è possibile ricavare informazioni sulla larghezza del cordone. Tale informazione è ridondante rispetto all'analisi del giunto freddo e meno accurata della precedente in quanto non vi è un'esatta coincidenza tra la zona fusa e il cordone, tuttavia ha interesse in quanto è proporzionale ad essa e hanno interesse principalmente le variazioni relative.

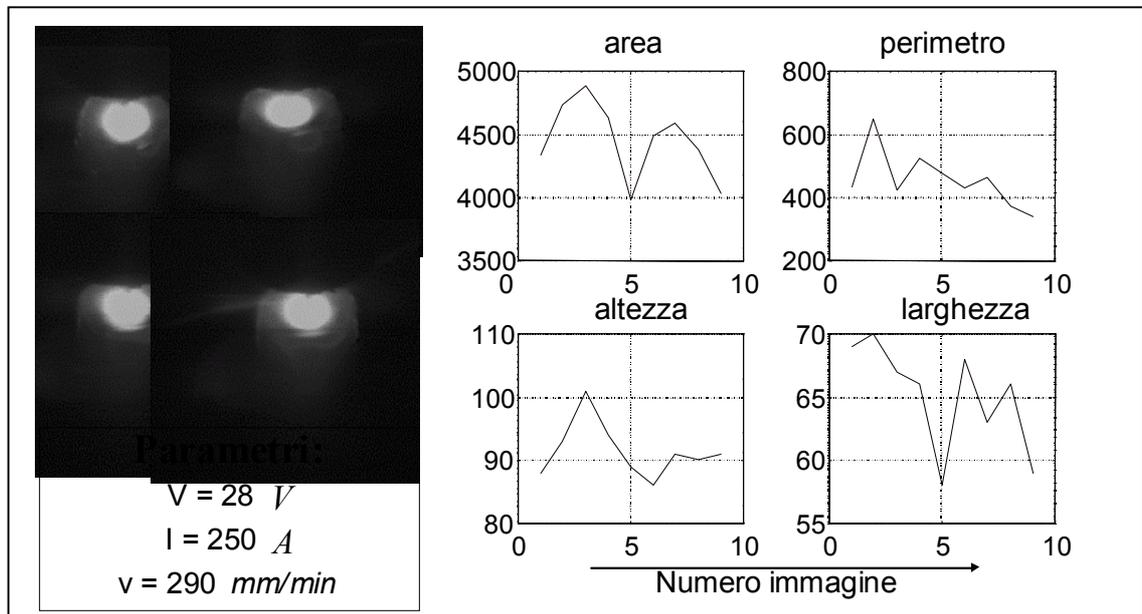


Figura 5.9: Rappresentazione del risultato dell'algorithm di misura delle caratteristiche geometriche della pozza.

Al fine di estrarre tali dati è necessario seguire delle accortezze in fase di acquisizione delle immagini; in particolare bisogna che l'area dell'immagine saturata dall'arco sia inferiore all'area della pozza. Se però si eccede in tale

riduzione si hanno conseguenze negative sul rapporto segnale rumore e diventa più difficile separare la pozza dallo sfondo.

Il tipico andamento delle grandezze indicate è rappresentato nei grafici in Figura 5.10.

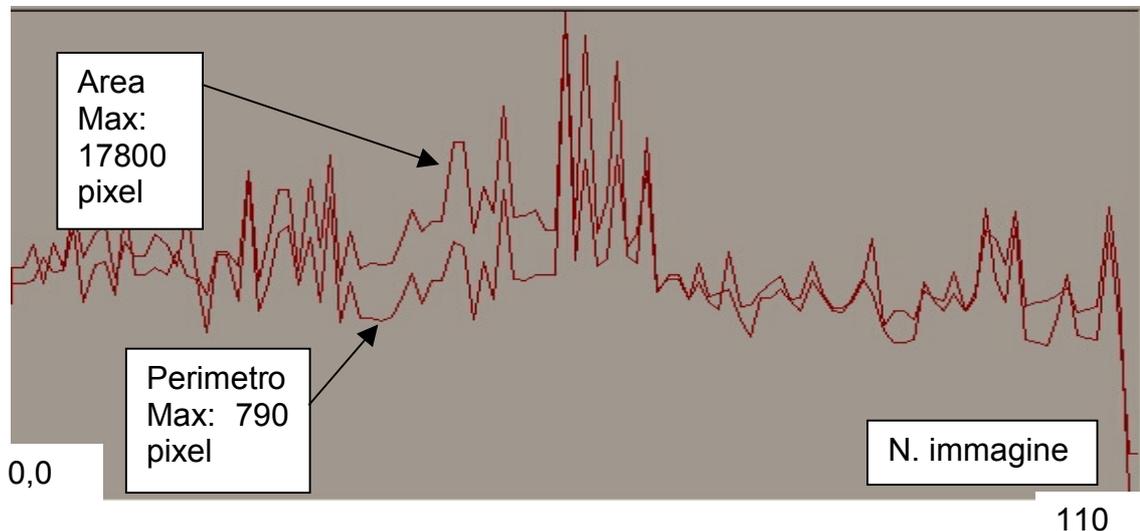


Figura 5.10: Esempio dell'andamento dell'area e del perimetro della pozza

Si è osservato, come intuibile, che le grandezze di tipo globale e non legate alla posizione di un punto sono più stabili e meno soggette a oscillazioni. Il segnale rappresentato in figura è non filtrato, per mostrare l'andamento effettivo delle grandezze.

Per la misura dei blob, si deve tenere conto che la parte anteriore della pozza risulta ostruita dalla torcia, nella configurazione scelta delle telecamere. Pertanto la loro misura viene compiuta sulla parte inferiore correggendo poi il valore in ipotesi di simmetria orizzontale, ad esempio, per l'area e l'altezza il valore viene moltiplicato per due.

Il limite della parte inferiore della pozza viene selezionato individuando il punto di massima larghezza, tenuto conto che essa ha una forma approssimativamente ellittica.

5.4.1- Asimmetria

Anche questa grandezza è ridondante rispetto all'analisi della parte fredda. E' possibile misurare lo spostamento rispetto all'asse del cianfrino (stick-off), sia dovuto ad errori che a passate affiancate, attraverso la posizione della pozza fusa.

5.4.2- Spruzzi

Il numero di spruzzi o scintille (spark) viene registrato e tenuto sotto controllo (Figura 5.11). Il procedimento è concettualmente semplice, l'immagine viene binarizzata ad un livello di soglia corrispondente a quello del bagno incandescente, partendo dalla considerazione che le scintille di metallo si trovano all'incirca alla sua stessa temperatura.

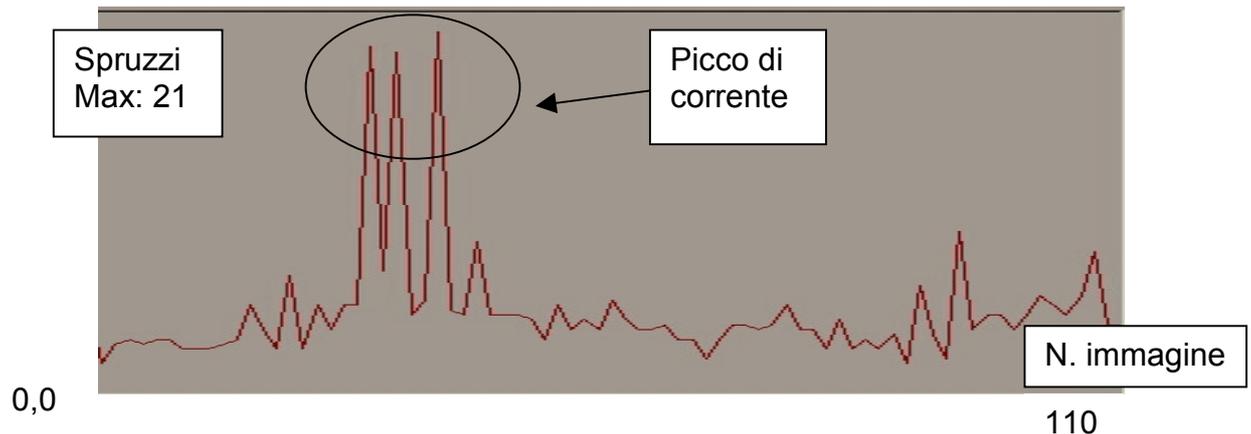


Figura 5.11: Andamento del numero di spruzzi (in ordinate) in una sequenza di saldatura; in ascissa si riporta il n°. d'ordine dell'immagine

Successivamente vengono contati i blob dell'immagine e tale numero è diminuito di una unità (la pozza stessa). Non viene posto un limite inferiore alla dimensione delle scintille, in quanto esse possono essere anche molto piccole e non vi è rischio di confusione con altri elementi, dato che, in assenza di scintille, lo sfondo deve essere uniformemente scuro. Prima del conteggio può essere opportuno eseguire un closing per ricollegare frange della pozza o del cordone che potrebbero essere erroneamente interpretate come scintille.

Si è notato che il numero di scintille non ha una variazione continua da un'immagine all'altra, in quanto il tempo di proiezione all'esterno dell'immagine è inferiore a quello di acquisizione, pertanto le scintille osservate in ogni immagine sono sempre diverse.

5.4.3- Instabilità dell'arco

E' possibile registrare fluttuazioni dell'arco utilizzando come parametro l'asimmetria. Queste variazioni sono in parte dovute al soffio magnetico, in parte sono indice che i parametri impostati non sono ottimali. Un caso limite è rappresentato dallo spegnimento dell'arco.

La stabilità viene valutata attraverso la simmetria del blob relativo, ottenuto ad un livello di soglia superiore a quello del bagno.

Il parametro da tenere sotto controllo in questo caso sarebbe il numero di spegnimenti in un certo intervallo di tempo, fissato in fase di programmazione

del sistema in funzione dei parametri della saldatura: per valori di tensione e corrente più bassi gli spegnimenti sono generalmente più frequenti in quanto l'arco è meno stabile.

5.4.4- Fumo

La presenza di fumo può essere registrata come una variazione di elevata entità delle dimensioni del blob principale.

La presenza di fumo non implica un effetto negativo diretto sulla qualità della saldatura, ma può rappresentare un indice della presenza di impurità, come grasso o sporcizia, la cui produzione di gas associata può comportare pericolose inclusioni.

Se viene avvertito del fumo, è necessario verificare il valore della corrente in ingresso, in quanto un brusco aumento di corrente esserne la causa. In caso contrario è necessario rilevare la presenza, richiamando l'attenzione dell'operatore. In caso positivo, si dovrà interrompere il processo e procedere a pulitura manuale.

5.4.5- Scoria

Nel bagno galleggia sempre della scoria, ma nel processo MIG esaminato l'entità è molto ridotta, come è possibile rilevare dalle immagini della pozza fusa e dall'osservazione diretta dei provini realizzati, in cui essa risulta concentrata in sottili strisce ai lati del cordone.

La rilevazione della scoria può essere raggiunta con lo sviluppo di algoritmi più sofisticati come l'analisi di sequenze d'immagini.

5.4.6- Modalità di trasferimento

Dall'osservazione delle sequenze d'immagini acquisite in short-arc e spray-arc non è possibile evincere la modalità per i seguenti motivi:

- non si ha visibilità delle gocce per l'eccessiva luminosità dell'arco, per la bassa frequenza di acquisizione e per la bassa risoluzione delle immagini (in ordine di importanza);
- si è tentato di discriminare tra i due casi valutando la differenza di luminosità dell'arco, ma si è riscontrato che le differenze visive non lo permettono. In particolare si è riscontrato che l'aspetto dell'arco in modalità spray-arc è simile a quello della modalità short-arc con parametri di tensione/corrente più elevati. Questo è stato confermato sottoponendo le immagini a saldatori esperti che hanno confermato che l'elemento discriminante è il rumore associato: cioè un crepitio di frequenza più elevata indica spray-arc e viceversa.

5.4.7- Fluidità

E' correlabile alla bagnabilità della pozza e quindi ai parametri della saldatura. Sono stati osservati gli elementi caratteristici: ondine e riflessi. Per la quantificazione è necessaria un'analisi di sequenze di immagini e hardware più potente per incrementare la frequenza di acquisizione.

5.4.8- Lunghezza effettiva del filo

Ai capi del generatore della saldatrice è possibile rilevare i valori della tensione. Tuttavia, il filo che fuoriesce dalla torcia determina una caduta di tensione che può essere determinata con sufficiente precisione essendo note le temperature e le caratteristiche fisiche degli elementi in gioco. Tale lunghezza può essere utilizzata per un controllo della saldatrice, avendo come riferimento la tensione effettiva.

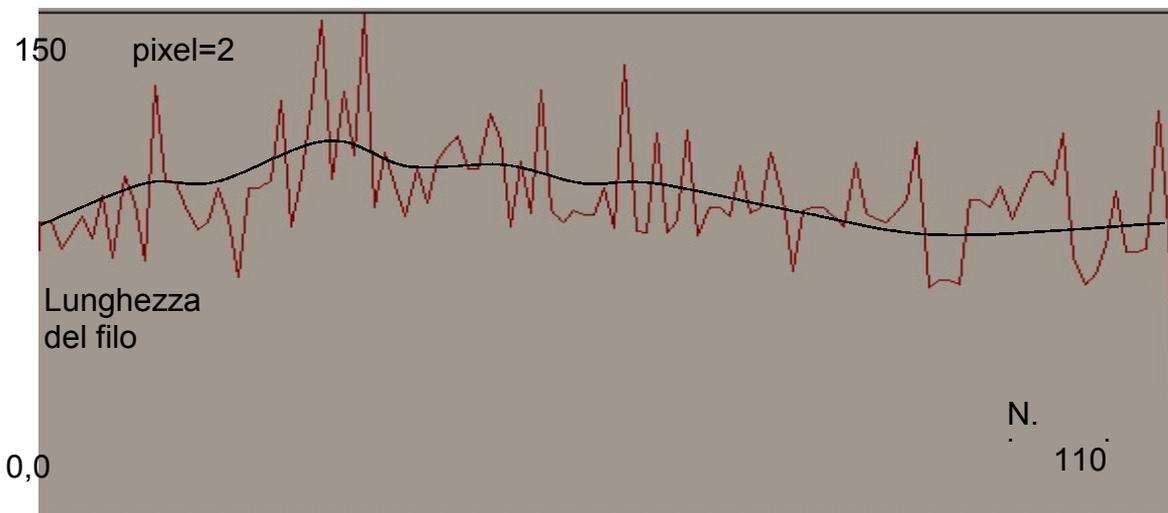


Figura 5.12: Andamento della lunghezza del filo in una sequenza di saldatura

In vista di tale controllo, viene registrata la lunghezza effettiva del filo con la seguente procedura.

La posizione di uscita del filo dalla torcia è nota dalla fase di installazione del sistema, in quanto la telecamera che riprende è solidale ad essa e rimane la stessa per tutta la saldatura. Nel sistema sviluppato, tale valore viene inserito manualmente con un doppio click del mouse nel menu di setup illustrato nel capitolo sullo sviluppo del software.

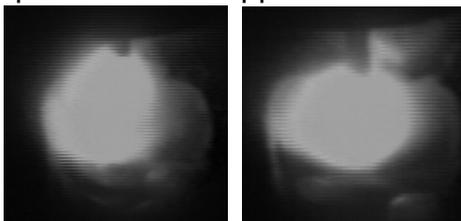


Figura 5.13: Esempio di variabilità della lunghezza del filo

L'altro estremo della torcia è il baricentro della zona più luminosa dell'arco che ha forma circolare e viene determinata utilizzando un elevato valore di soglia per la binarizzazione, prossimo a quello di saturazione, che interessa esclusivamente l'arco.

La grandezza ottenuta in pixel può essere agevolmente convertita in millimetri

attraverso la fase di calibrazione del sistema.

Nel grafico di Figura 5.12 viene mostrato l'andamento della lunghezza del filo di cui è evidenziata la brusca variazione tra le due immagini consecutive riportate in Figura 5.13.

5.5- *Discussione*

Sono state indicate le principali feature estratte dalle immagini della pozza fusa e dell'arco e gli algoritmi per la riduzione del rumore.

Tali feature sono difficilmente correlabili ai principali parametri del processo. Tuttavia una vista diretta dell'arco permette di avere un controllo diretto sull'andamento del processo, che poi può essere verificato per ridondanza attraverso la parte fredda.

In questa fase, la maggior parte degli sforzi è stata diretta allo sviluppo e test di algoritmi per il pre-processing, mentre è risultata più agevole rispetto all'analisi del cordone, l'estrazione delle feature geometriche dai blob ottenuti.

Dall'analisi dei dati sperimentali è possibile evidenziare la presenza di eventuali anomalie, quali fumo, spegnimento dell'arco o spruzzi.

La correlazione delle altre feature ai parametri del processo richiede invece la raccolta di dati sperimentali dal sistema durante la fase di integrazione, in cui sarà possibile registrare i valori effettivi di tali parametri e l'effetto dei controlli testati.

6- Algoritmi di elaborazione delle immagini acquisite: analisi del profilo del cordone

In questo capitolo viene descritta la struttura del software per l'elaborazione delle immagini del cordone di saldatura illuminato con linea laser. Si distinguono i due moduli destinati al pre-processing delle immagini e al calcolo e controllo delle feature che descrivono la geometria del cordone. In particolare, per quanto riguarda la prima fase di trattamento delle immagini fino all'estrazione della linea del profilo, si distinguono le operazioni effettuate sulle immagini acquisite con il sensore RTM e con quello Qualital, che presentano caratteristiche molto diverse (si veda il Capitolo 3 sulle prove di saldatura).

6.1- Acquisizione delle immagini dei cordoni

L'immagine del cordone è ottenuta proiettando una lama di luce laser sulla saldatura; essa interseca la superficie del pezzo secondo una linea luminosa deformata in base all'andamento del profilo del cordone stesso (si veda lo schema di Figura 6.1, così come lo schema dell'attrezzatura utilizzata durante le prove presso lo stabilimento di Ansaldo Energia, Capitolo 3).

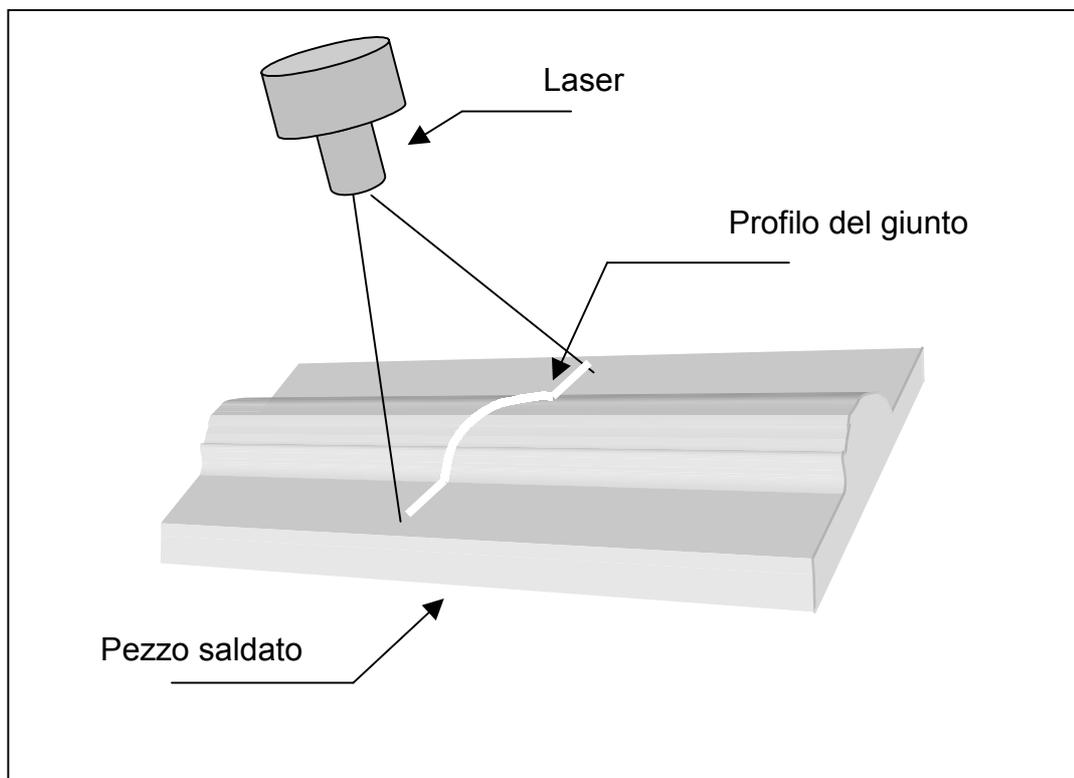


Figura 6.1: Sistema per la visualizzazione della forma del profilo del cordone di saldatura.

6.2- Estrazione del profilo

Dopo che la sequenza “cold” è stata acquisita, si può procedere ad estrarre il profilo (*skeleton*) del cordone di saldatura da ciascuna delle immagini. Ciò viene fatto mediante un algoritmo che consiste essenzialmente in tre passi:

- Binarizzazione
- Assottigliamento (*thinning*) dell'immagine binarizzata
- Memorizzazione delle coordinate dei punti del profilo

Questa sequenza di operazioni è stata modificata facendola precedere da un'opportuno pre-trattamento delle immagini, sia RTM che Qualital, per poter riconoscere in esse il profilo laser nonostante le loro differenze (si vedano i paragrafi seguenti sul pre-processing delle immagini): questa fase di analisi delle immagini è stata sviluppata come modulo a sé stante del software. Essa consiste nel calcolo delle coordinate dei punti del profilo a partire dalle immagini del cordone (si veda Figura 6.2); tali coordinate vengono quindi memorizzate in un apposito vettore di dati (si vedano i paragrafi precedenti, in particolare il Capitolo 4), la matrice 'Profile'.

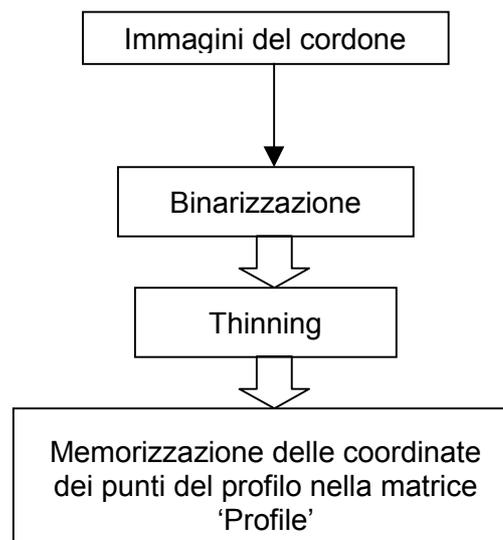


Figura 6.2: Schema dell'operazione di estrazione del profilo; l'operazione consiste nel calcolo delle coordinate dei punti del profilo a partire dalle immagini delle sequenze

6.3- La Region Of Interest (ROI)

Con il sistema di ripresa adoperato durante le prove sinora condotte, si ottengono immagini in cui la lama laser è contenuta in una porzione relativamente ristretta dell'inquadratura, mentre la restante parte non è significativa. È dunque conveniente, ai fini di una maggiore rapidità di

esecuzione dei calcoli, far operare l'algoritmo di estrazione solo nella zona che contiene la lama laser.

Tale area, detta *region of interest (ROI)*, non deve essere selezionata manualmente per ogni sequenza da cui si vogliono estrarre i profili poiché per ognuna delle due tipologie di immagini, RTM e Qualital, il profilo occupa una certa posizione all'interno dell'immagine: tale regione è comunque fissata per ogni tipologia di immagine.

Essa è un rettangolo di $n \times h$ pixel (base \times altezza). I punti rappresentanti il profilo hanno dunque coordinate:

$$x: 0 \leq x \leq n$$

$$y: 0 \leq y \leq h$$

E' stato fissato un *ROI* di partenza, diverso per i due tipi di immagini, di dimensioni maggiorate per garantire di poter contenere in ogni caso il profilo; al suo interno avviene l'individuazione della linea del profilo, a partire da un estremo, e intorno al profilo, ovvero alla macchia binarizzata, si individua un *ROI* di dimensioni ancora più ristrette, le minime per racchiudere il profilo.

All'interno di questo rettangolo, avviene una scansione per colonna alla ricerca di punti appartenenti al profilo derivanti dai passi di binarizzazione ed assottigliamento: per ogni colonna, cioè per ogni valore di ascissa, si memorizza l'ordinata del punto corrispondente (si veda il paragrafo 6.4- *Rappresentazione vettoriale del profilo*).

Nelle Figure 6.3.a e 6.3.b, si riporta una rappresentazione del *ROI* inizialmente scelto sulle immagini Qualital ed RTM, rispettivamente.

I passi successivi di individuazione del profilo e restringimento del *ROI* ad uno stretto intorno del profilo sono descritti in dettaglio nei paragrafi seguenti 6.6- *Pre-processing delle immagini del profilo acquisite con il sensore Qualital* e 6.7- *Pre-processing delle immagini del cordone acquisite con il sensore RTM*.

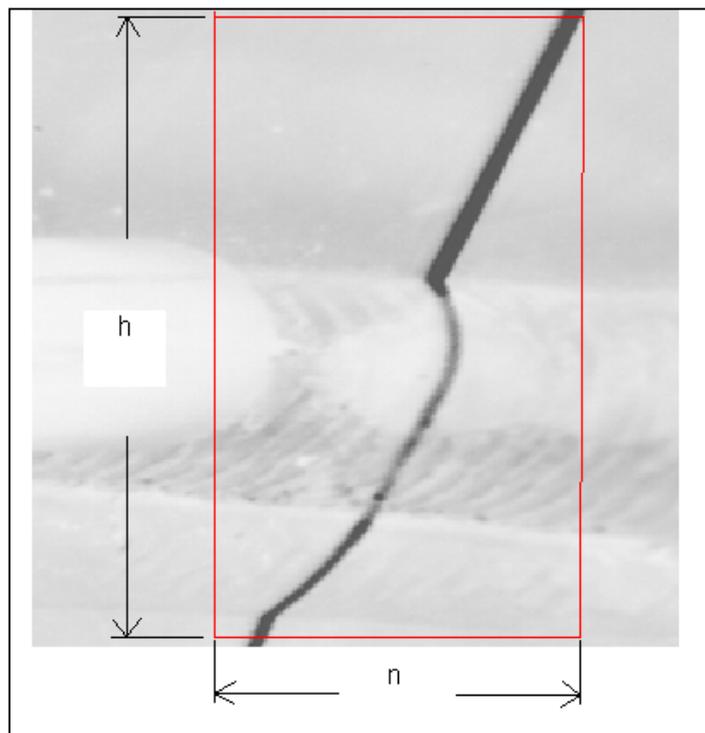


Figura 6.3.a: Rappresentazione del ROI, come rettangolo contenente il profilo (immagine a colori invertiti), nel caso di un'immagine Qualital

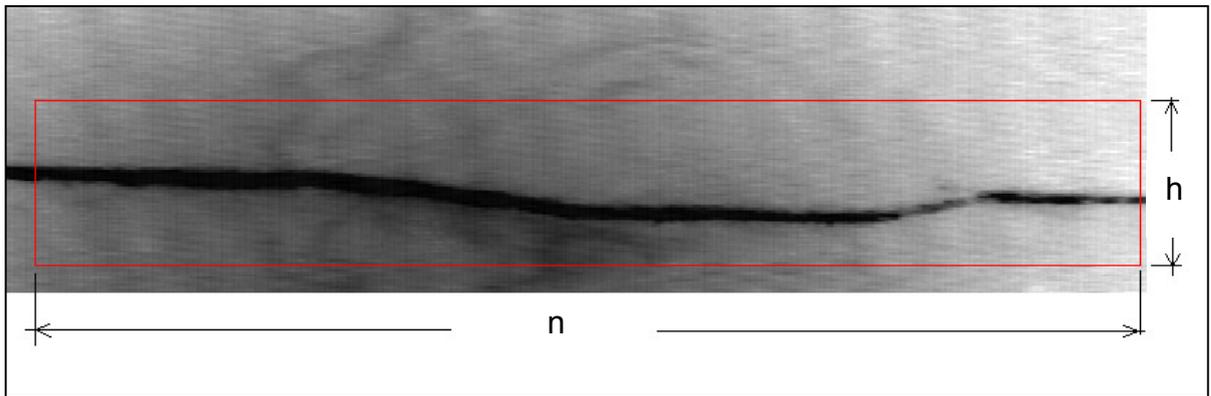


Figura 6.3.b: Rappresentazione del ROI, come rettangolo contenente il profilo (immagine a colori invertiti), nel caso di un'immagine RTM

6.4- Rappresentazione vettoriale del profilo

Il risultato delle operazioni di binarizzazione e *thinning* (assottigliamento) è, idealmente, una linea continua di pixel bianchi su sfondo nero, che può essere rappresentata, ad esempio in ambiente Matlab, con un vettore.

La corrispondenza tra il profilo ed il vettore si realizza assegnando al j -esimo elemento del vettore l'ordinata del punto di ascissa j del profilo. Se ad una ascissa non corrisponde alcun punto del profilo, come nel caso di una eventuale interruzione, il relativo elemento del vettore è posto uguale a zero (si veda la Figura 6.4).

Così facendo si ottiene un vettore di dimensione n pari alla larghezza in pixel del ROI.

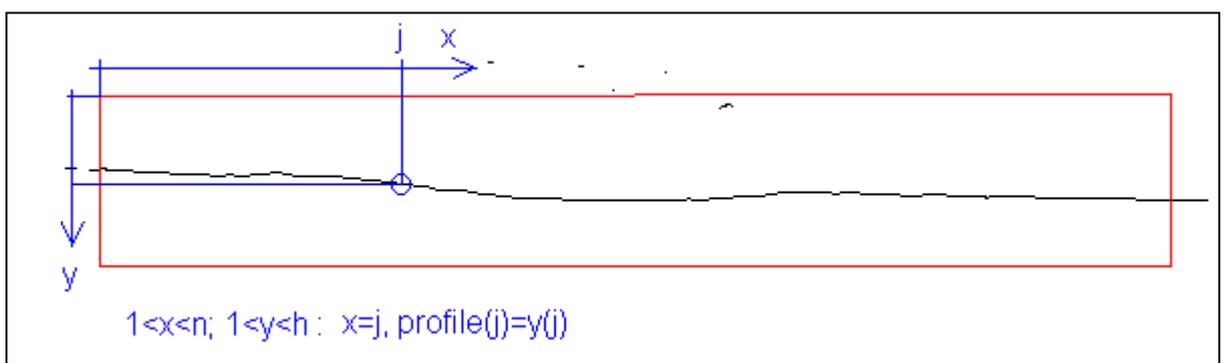


Figura 6.4: Rappresentazione vettoriale del profilo: la linea nera su sfondo bianco è il risultato dei passi di binarizzazione ed assottigliamento a partire da un immagine del profilo laser (colori invertiti)

6.5- Problemi relativi alla fase di binarizzazione. Logica di ricostruzione del profilo continuo

Nell'eseguire l'estrazione del profilo, occorre scegliere opportunamente la soglia di binarizzazione. Infatti, una soglia di binarizzazione troppo alta produce interruzioni del profilo, mentre una soglia troppo bassa non consente l'eliminazione di alcune zone non appartenenti alla linea di luce laser, come ad esempio i riflessi sul cordone o sul pezzo.

In particolare, nel caso delle immagini RTM (si veda oltre il paragrafo sul *pre-processing* di queste immagini), una soglia troppo elevata estende in modo eccessivo la larghezza della zona binarizzata nella parte centrale del profilo, mentre una soglia troppo bassa produce l'eliminazione delle zone estreme della linea: i lati e il centro delle immagini presentano condizioni di luminosità molto diverse.

Può inoltre accadere che l'immagine presenti zone luminose aventi livello di grigio praticamente uguale a quello della lama di luce laser. Ciò in particolare avviene quando la luce ambiente si riflette sul cordone e la linea del laser non è molto nitida, a causa ad esempio di sporcizia depositata sulle lenti cilindriche del laser stesso. In questi casi nessuna soglia permette di isolare perfettamente la lama laser dallo sfondo.

E' stato necessario sviluppare un algoritmo in grado di scegliere la soglia opportuna di binarizzazione, valutando la buona qualità dei risultati ottenuti con la binarizzazione: esso viene descritto nei successivi paragrafi sul *pre-processing* delle immagini Qualital ed RTM.

Tuttavia il risultato è spesso ancora un profilo contenente discontinuità, ossia interruzioni e punti non appartenenti alla linea laser; un esempio di tali errori è riportato in Figura 6.5. Si tratta di difetti del profilo non dovuti alla presenza di reali difetti del cordone, ma legati, come visto, alla fase di ripresa. In tali condizioni risulta più difficile ottenere informazioni affidabili dall'analisi delle caratteristiche del profilo: è necessaria una fase di "pulitura" del profilo estratto, ossia l'eliminazione di quelle discontinuità del profilo non dovute a difetti del cordone.



Figura 6.5. Esempio di profilo estratto con irregolarità dovute a problemi di binarizzazione: interruzioni e riflessi del laser sul tratto precedente del giunto (immagine a colori invertiti)

Ciò si ottiene nel modo seguente:

1. per i riflessi irregolari all'esterno della linea del profilo: imposizione della condizione di appartenenza di un punto al profilo, ovvero limitazione del gradiente di ordinata tra un punto del profilo e il successivo;

2. per le interruzioni: ricostruzione tramite interpolazione lineare.

Ciò è realizzato da un modulo del software IVision (si veda il Capitolo 4 sul software), che può essere reso attivo o no a seconda della tipologia del profilo che si vuole estrarre. Il software è in grado di ricostruire la continuità del profilo eliminando:

– le cuspidi, dovute a punti luminosi estranei al profilo, ma mantenuti nell'immagine al termine della binarizzazione;

– i "buchi", dovuti alla non omogenea luminosità della lama laser.

L'algoritmo riceve in ingresso l'immagine binarizzata e assottigliata del ROI contenente il profilo, relativa ad un'immagine in una sequenza. In dettaglio, esso compie la seguente successione di operazioni:

1. identificazione del primo tratto rettilineo del profilo;

2. definizione del massimo gradiente ammissibile tra due pixel binarizzati consecutivi appartenenti al profilo (differenza tra le ordinate di due punti consecutivi);

3. inseguimento del profilo, ovvero percorrimento dell'immagine, con sostituzione dei tratti nulli, cioè mancanti, e dei punti che non rispettano il limite del gradiente.

La sostituzione avviene con interpolazione lineare tra l'ultimo punto dell'ultimo tratto di profilo individuato e il primo punto del tratto successivo.

6.6- Pre-processing delle immagini del profilo del cordone acquisite con il sensore Qualital

Le immagini del profilo illuminato con luce laser acquisite con il sensore Qualital durante le prove presso lo stabilimento di Ansaldo Energia a Legnano presentano le seguenti caratteristiche (si veda la Figura 2.5 del Capitolo 2):

1. la linea laser risulta inclinata di un angolo leggermente variabile nel quadro dell'immagine a causa della modalità di montaggio del sensore sul braccio del robot di saldatura. La variabilità dell'angolo è la stessa in tutte le sequenze acquisite e dipende solo dall'oscillazione dell'end effector del robot di saldatura, tipica della lavorazione Ansaldo (si veda il paragrafo 3.1- *Tipologia di saldatura svolta da Ansaldo Energia e difetti tipici*);

2. la linea laser è inclinata di un angolo fisso rispetto all'asse del cordone, per lo stesso motivo detto al punto precedente;

3. la luce laser è leggermente disturbata dalla luce ambiente, poiché l'acquisizione è stata compiuta a saldatura terminata con laser che emette nel campo visibile (si veda il paragrafo 2.4- *Hardware per l'acquisizione delle immagini realizzato da Qualital*) e non è stato usato alcun filtro all'obiettivo della telecamera: la conseguenza è che la semplice binarizzazione dell'immagine non è sufficiente a separare la linea laser, più luminosa, dallo sfondo scuro. I riflessi della luce ambiente sono dello stesso livello luminoso della linea laser e molto variabili da una sequenza all'altra (per esempio, a

- causa del diverso momento della giornata in cui sono state riprese) e nel corso di una stessa sequenza (per esempio, a causa della forma del cordone e del diverso angolo di incidenza della luce sulla sua superficie);
4. le immagini acquisite relative alle diverse prove realizzate rappresentano cordoni singoli o affiancati ad altri precedentemente depositi sul pezzo in lavorazione: dunque la linea laser presenta diverse geometrie; in particolare, nel caso di cordoni affiancati si distingue tra il caso di cordoni depositi spostando l'asse di avanzamento della saldatura da destra verso sinistra o viceversa.

I primi due passi di elaborazione delle immagini del profilo sono costituiti da:

1. individuazione della regione dell'immagine in cui si trova il profilo nell'immagine non trattata (definizione del ROI *Region of Interest* per la binarizzazione): poiché l'inquadratura della zona di saldatura è fissa, tale regione può essere stabilita una volta per tutte ed è valida per tutte le sequenze (si veda Figura 6.6);

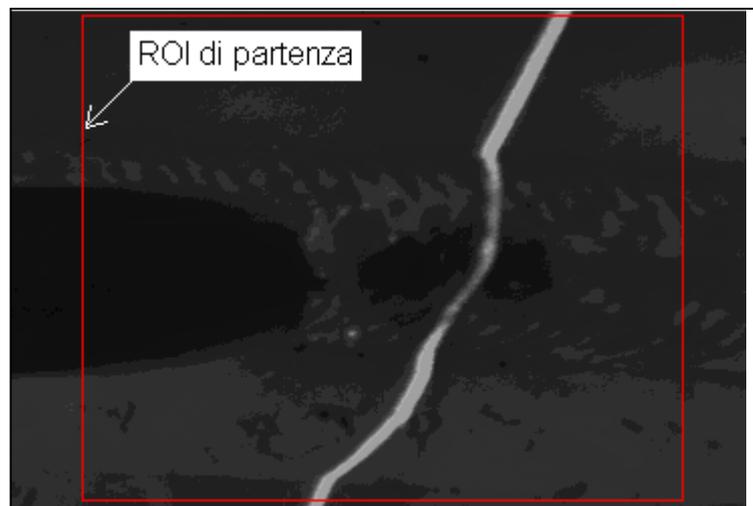


Figura 6.6: ROI di partenza, contenente il profilo laser nell'immagine non trattata

2. binarizzazione a livello di soglia fisso per ogni sequenza: il livello di soglia viene determinato mediante una fase iniziale di autoapprendimento (si veda il paragrafo seguente 6.6- *Pre-processing delle immagini acquisite con il sensore RTM*) durante la quale si testano diversi valori della soglia di binarizzazione su ciascuna immagine della sequenza esaminata. Il livello di soglia rappresenta il valore di compromesso che restituisce un cordone sufficientemente continuo con il minor numero di disturbi nel resto dell'immagine (si veda il punto 3): queste caratteristiche sono tradotte in condizioni geometriche che la macchia ottenuta dalla binarizzazione deve soddisfare. Il fatto che la soglia sia variabile da una sequenza ad un'altra è dovuto alla variabilità delle condizioni di illuminazione della saldatura nel corso della giornata di prove (punto 3): i valori di livello di grigio usati per la soglia oscillano tra 75 e 90 (Figura 6.7.a).
3. assottigliamento (ovvero *thinning*) delle zone separate dallo sfondo mediante la binarizzazione (Figura 6.7.b).

I successivi passi di elaborazione (che sono propri delle immagini acquisite con il sensore Qualital) consistono in:

1. rotazione del ROI contenente il profilo, per ottenere una linea che si sviluppi orizzontalmente, come è nelle immagini del sensore RTM (si vedano le Figure 6.8 e 6.9);
2. individuazione della zona dell'immagine ruotata che contiene interamente il profilo: ROI ristretto (Figura 6.10);
3. ricostruzione delle interruzioni del profilo ed eliminazione dei disturbi dovuti ai riflessi irregolari della luce laser o ambiente, mediante interpolazione lineare (si veda Figura 6.11);
4. estrazione delle coordinate dei punti che costituiscono il profilo ricostruito.

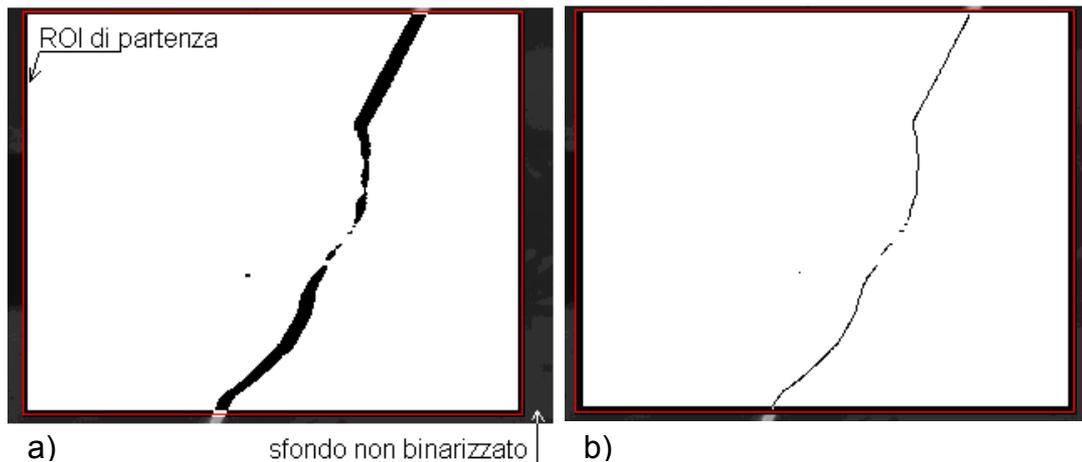


Figura 6.7: Risultato dei passi di binarizzazione (a) e thinning (b) del profilo all'interno del ROI di partenza (l'immagine mostra il risultato in colori invertiti, mentre lo sfondo non binarizzato è in colori veri)

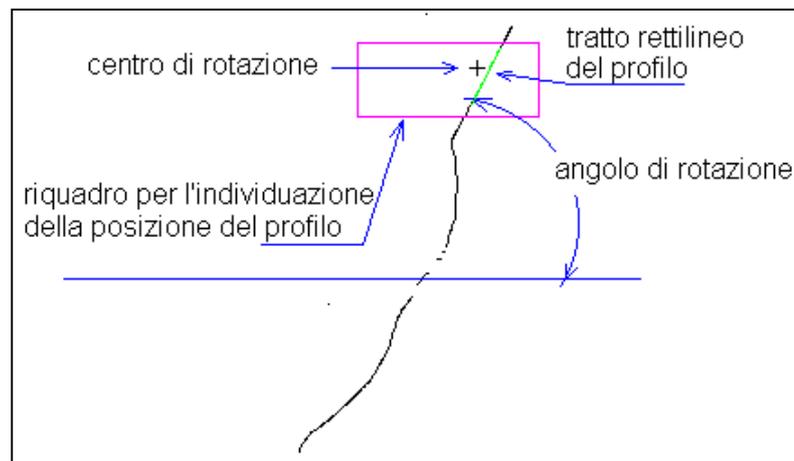


Figura 6.8: Individuazione dell'estremo rettilineo del profilo e calcolo dell'angolo di rotazione del ROI per ottenere un profilo a sviluppo rettilineo (immagine a colori invertiti)

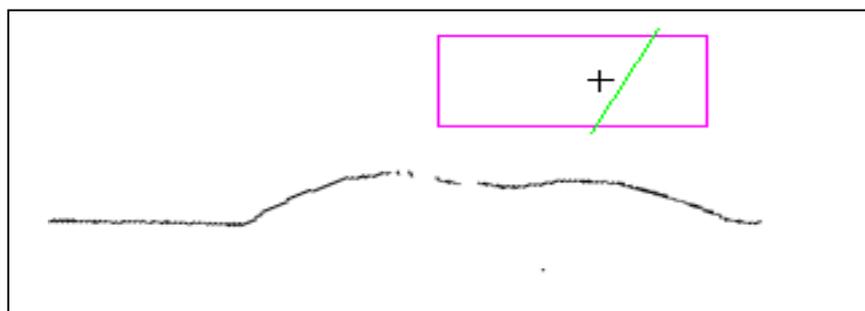


Figura 6.9: Risultato della rotazione del profilo (immagine a colori invertiti)

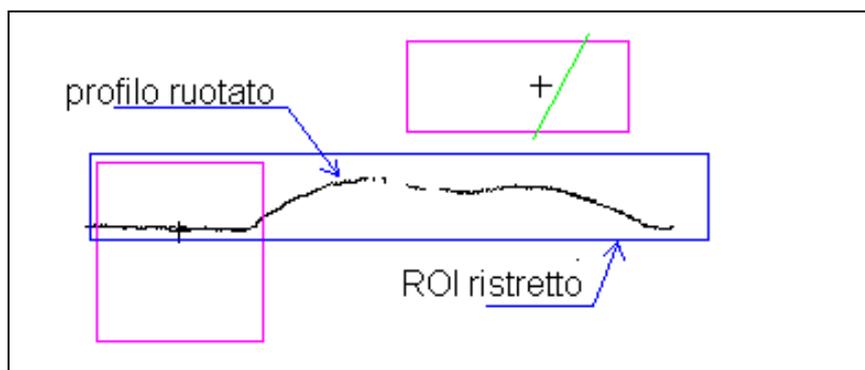


Figura 6.10: Individuazione del ROI ristretto intorno al profilo orizzontale, in cui compiere l'estrazione del profilo (immagine a colori invertiti)

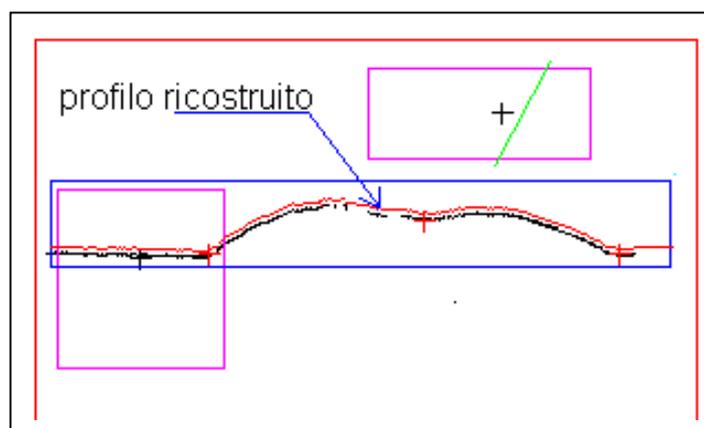


Figura 6.11: Ricostruzione del profilo: eliminazione di interruzioni e punti fuori della linea (immagine a colori invertiti)

L'angolo per la rotazione dell'immagine viene determinato individuando il riferimento rettilineo costituito dalla porzione di luce laser proiettata sulla superficie piana del pezzo in lavorazione: per questo è importante conoscere la tipologia di immagine che viene elaborata. Come detto, è possibile avere l'immagine di un cordone singolo o affiancato: nel primo caso, è possibile risalire ad un riferimento rettilineo per la rotazione su entrambi i lati del profilo. Al contrario, se sono presenti uno o più cordoni adiacenti a quello appena deposto, il riferimento rettilineo va cercato nell'immagine nella zona che corrisponde alla direzione di spostamento della saldatura (definita rispetto alla torcia, *da sinistra a destra* oppure *da destra a sinistra*). In ciascun caso, è nota la posizione del tratto rettilineo di riferimento (solo raramente risulta tagliato nelle immagini, a causa dell'oscillazione della torcia): in questa regione si

compie il calcolo dell'angolo di inclinazione della linea del profilo, che è lo stesso angolo di cui il profilo viene ruotato.

Dopo la rotazione è possibile restringere ulteriormente la regione di interesse che contiene la linea del profilo: viene definito un nuovo ROI di dimensioni fisse, che contiene interamente il profilo. Al suo interno viene condotta la ricerca dei punti della matrice 'Profile': poiché il nuovo ROI può essere di dimensioni molto ridotte, permette l'eliminazione quasi completa dei disturbi dovuti alle altre fonti luminose.

Il risultato finale di queste operazioni è la matrice 'Profile'.

6.6- Pre-processing delle immagini acquisite con il sensore RTM

Le immagini del profilo laser del cordone acquisite con il sensore RTM presentano le seguenti caratteristiche (si veda la Figura 2.3 del Capitolo 2):

1. la linea laser risulta orizzontale nell'inquadratura, con leggere variazioni dell'inclinazione ($\pm 2^\circ$) a causa del moto combinato di avanzamento ed oscillazione dell'end effector del robot durante la saldatura;
2. la luce laser è disturbata dalla bagliore dell'arco, nonostante l'uso di un laser che emette in una regione dello spettro in cui l'emissione dell'arco è di minore intensità e di un filtro centrato sulla lunghezza d'onda del laser. I disturbi sono di duplice origine: la luce direttamente emessa dall'arco, che è ancora di notevole entità nella zona in cui il laser viene proiettato, e "l'immagine" dell'arco, dovuta alle radiazioni che da esso si introducono nel percorso ottico della telecamera usata per la ripresa del profilo laser. Il risultato è una forte variazione della luminosità dell'immagine passando dalla parte centrale a quelle laterali;
3. le immagini acquisite relative alle diverse prove realizzate rappresentano solo cordoni singoli: dunque la linea laser presenta una geometria non molto variabile. Tuttavia, a causa della diminuzione del campo inquadrato rispetto alle immagini Qualital e all'oscillazione laterale della torcia durante la saldatura, il profilo del giunto risulta tagliato alternativamente sulla destra o sulla sinistra.

Il primo passo di elaborazione delle immagini del profilo è costituito dalla definizione automatica di una soglia di binarizzazione opportuna per la separazione della linea del profilo dallo sfondo scuro; a questo scopo, l'algoritmo compie i seguenti passi:

1. binarizzazione ad un livello di soglia iniziale fissato (128), con l'ottenimento di una o più zone chiare molto estese al centro e più sottili ai lati;
2. conteggio e analisi delle macchie ottenute, mediante alcune operazioni di *blob analysis*, disponibili come funzioni della scheda Matrox: calcolo dell'area, del diametro massimo, dei diametri in direzione orizzontale, verticale e a 45° ; queste grandezze sono una misura dell'estensione della macchia; infine calcolo del numero di Eulero, che è una misura della regolarità della macchia (presenza di buchi, frastagliamento del contorno);
3. eliminazione di tutte le macchie ottenute che non rispondono ai requisiti voluti per le caratteristiche suddette; se il risultato dell'eliminazione è una sola

macchia, si ritiene che questo sia il profilo binarizzato. Se il risultato dell'eliminazione è nessuna macchia, si procede ad una nuova binarizzazione ad un livello di soglia aumentato di 5, ripetendo ancora i passi dall' 1 al 3;

4. assottigliamento (ovvero *thinning*) delle macchia ottenuta mediante la binarizzazione.

A questo punto, l'immagine ottenuta è del tipo di quella di Figura 6.11. I successivi passi di elaborazione (che sono propri delle immagini acquisite con il sensore Qualital) consistono in:

1. rotazione del ROI contenente il profilo, per ottenere una linea che si sviluppi orizzontalmente: gli angoli di rotazione risultano molto piccoli, variabili da -2° a $+2^\circ$;
2. estrazione delle coordinate dei punti che costituiscono il profilo.

L'angolo per la rotazione dell'immagine viene determinato individuando il riferimento rettilineo costituito dalla porzione di luce laser proiettata sulla superficie piana del pezzo in lavorazione: per questo è importante conoscere la tipologia di immagine che viene elaborata, cioè la posizione del tratto piano all'interno dell'immagine. Purtroppo, l'oscillazione laterale della torcia ne provoca la variazione più volte durante una sequenza. Quando il riferimento venga a mancare si compie una rotazione del profilo di un angolo stabilito come media tra i valori massimo e minimo degli angoli precedentemente calcolati.

All'interno del ROI avviene l'estrazione delle coordinate dei punti del profilo: il risultato finale di queste operazioni è la matrice 'Profile'.

6.6- Algoritmi per l'estrazione di feature dalle immagini del profilo del cordone di saldatura

In questa sezione è descritto il funzionamento degli algoritmi di calcolo delle feature del profilo del giunto correlate ai difetti di saldatura. Nella Figura 6.12 si riporta il diagramma di flusso che mostra i passi principali dell'elaborazione delle immagini e come in essa si inserisca la fase di calcolo.

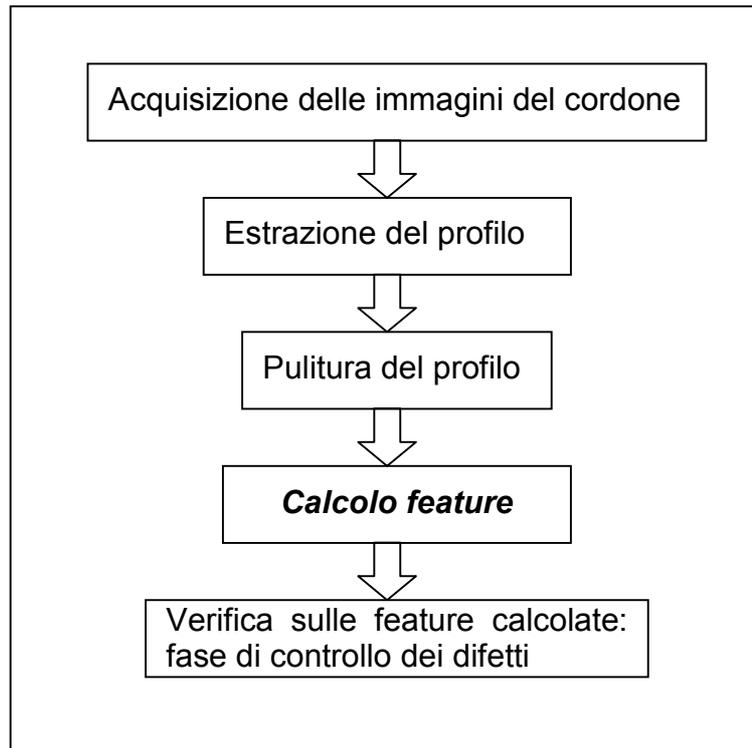


Figura 6.12: Diagramma di flusso dell'algorithm seguito per la determinazione delle feature.

6.7- Esame visivo delle sequenze “cold”

Le sequenze sono state sottoposte ad un approfondito esame visivo. Per ognuna di esse è stata compilata una scheda che registra i numeri d'ordine delle immagini in cui la lama laser evidenzia i vari difetti; nelle schede sono anche descritti qualitativamente l'aspetto geometrico del cordone e le sue variazioni di forma nel corso della sequenza.

Ciò ha consentito di:

- evitare che l'algorithm operasse su profili rappresentativi di difetti del cordone;
- verificare la correlazione tra le *feature* del profilo e i difetti del cordone;
- verificare la validità degli algoritmi di calcolo delle feature per l'individuazione dei difetti.

Le tabelle sono raccolte in Appendice: per altri riferimenti e descrizioni delle immagini acquisite si veda il Capitolo 3 sulle prove di saldatura (paragrafo 3.4- *Risultato delle prove: descrizione delle immagini ottenute*). Di seguito si riportano alcune delle immagini significative per illustrare la presenza di difetti sul cordone. La Figura 6.13 illustra l'aspetto tipico di un profilo corretto nel caso di due cordoni adiacenti.

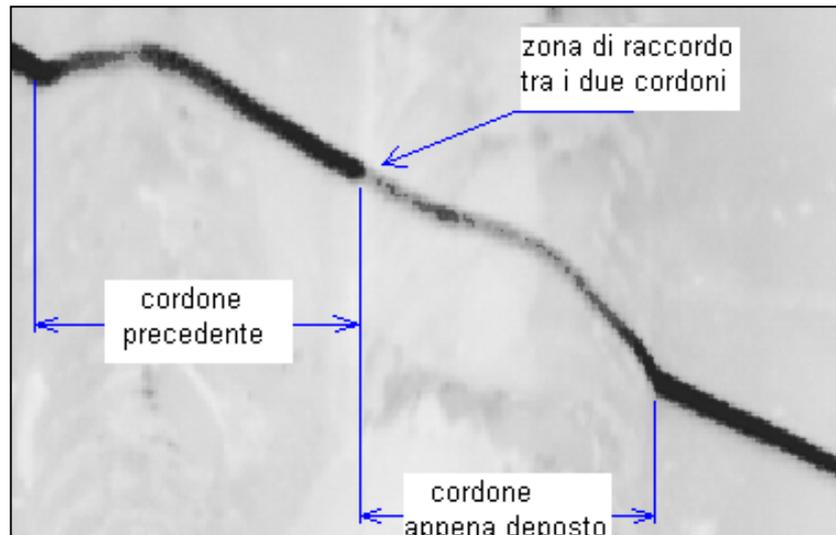


Figura 6.13: Profilo corretto di due giunti adiacenti esenti da difetti (immagine ruotata e a colori invertiti)

6.7.1- Porosità e ossidazioni

Le porosità e le ossidazioni sono dovute al fenomeno di allontanamento del gas di protezione dal bagno oppure alla presenza di gas che si sviluppa all'interno del bagno, spesso a causa delle sostanze grasse depositate sul cianfrino.

Esse sono visibili come deformazioni della linea del profilo laser, che ne provocano deviazioni, variazioni brusche di pendenza (si veda Figura 6.14).

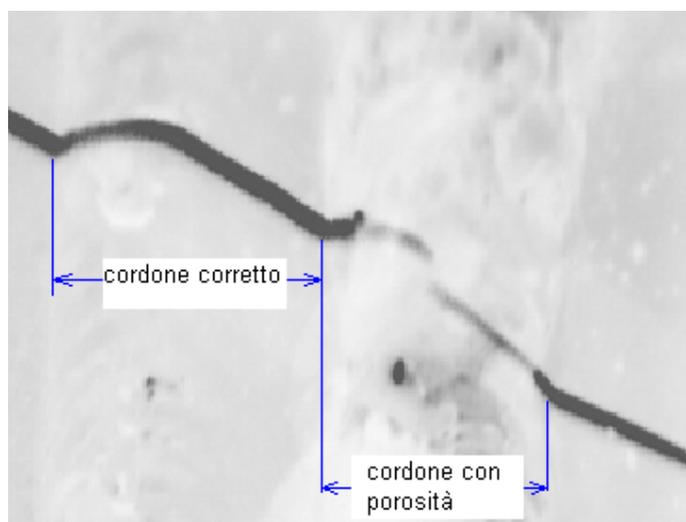


Figura 6.14: Immagine di un profilo tratto dalla sequenza 'Airjet', imm. n°. 113: sono evidenti le zone di irregolarità del profilo dovute alla presenza di porosità

6.7.2- Irregolarità di larghezza, altezza e area: aumento o diminuzione

Le irregolarità della larghezza del giunto sono visibili come aumento o diminuzione delle dimensioni del cordone, provocate dalla variazione della velocità di avanzamento della saldatura. Le Figure 6.15 e 6.16 illustrano rispettivamente la diminuzione e l'aumento delle dimensioni del cordone nelle due sequenze di saldatura 'Velocity+' e 'Velocity-'.

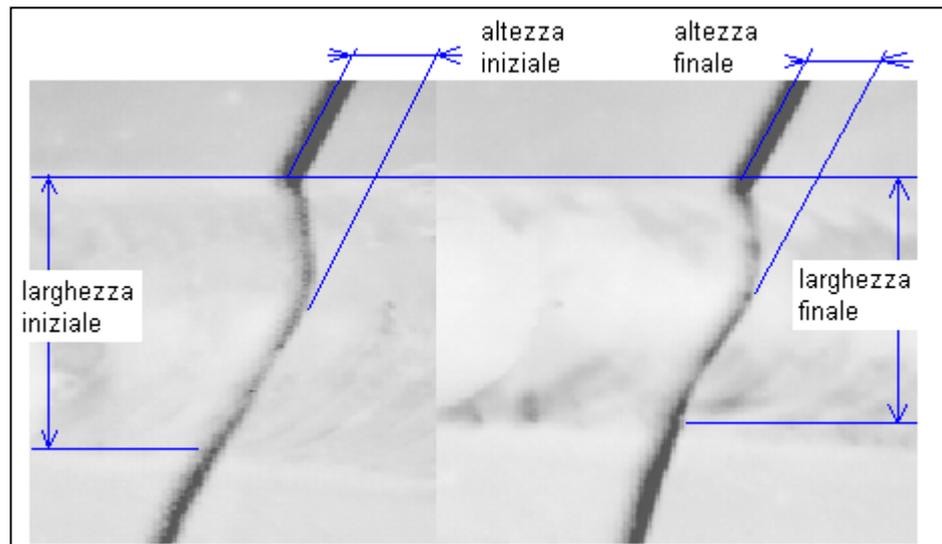


Figura 6.15: Immagini di profili tratti dalla sequenza 'Velocity+', imm. n°. 64 e n°. 647: dal confronto tra i due profili si osserva la diminuzione delle dimensioni del giunto (immagini a colori invertiti)

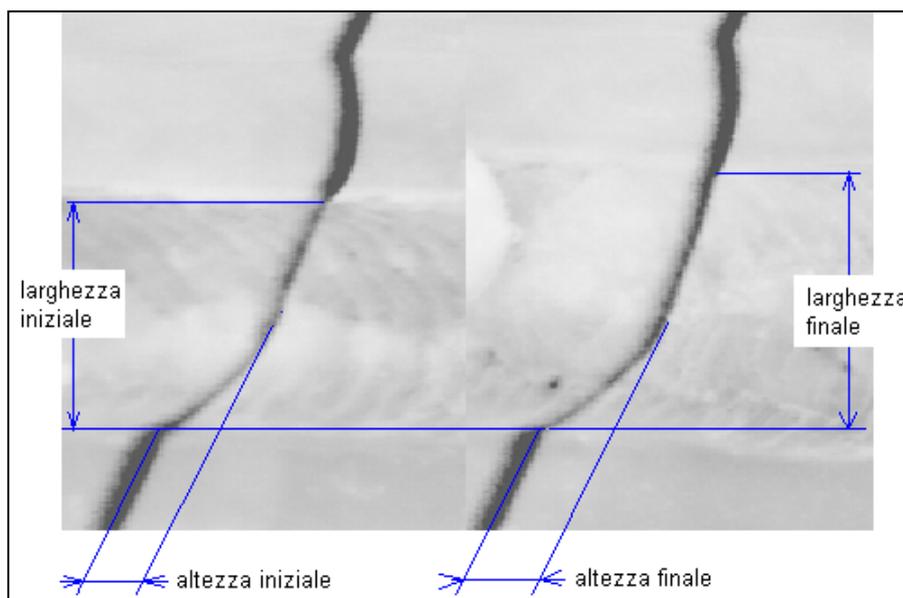


Figura 6.16: Immagini di profili tratti dalla sequenza 'Velocity-', imm. n°. 112 e n°. 650: dal confronto tra i due profili si osserva l'aumento delle dimensioni del giunto (immagini a colori invertiti)

6.7.3- Separazione o sovrapposizione di cordoni adiacenti: irregolarità di raccordo tra due cordoni adiacenti

I cordoni adiacenti possono presentare irregolarità nella zona di raccordo a causa della diminuzione o dell'aumento del valore dell'interasse che esce dai valori corretti, ovvero a causa di una variazione irregolare di *stick off*.

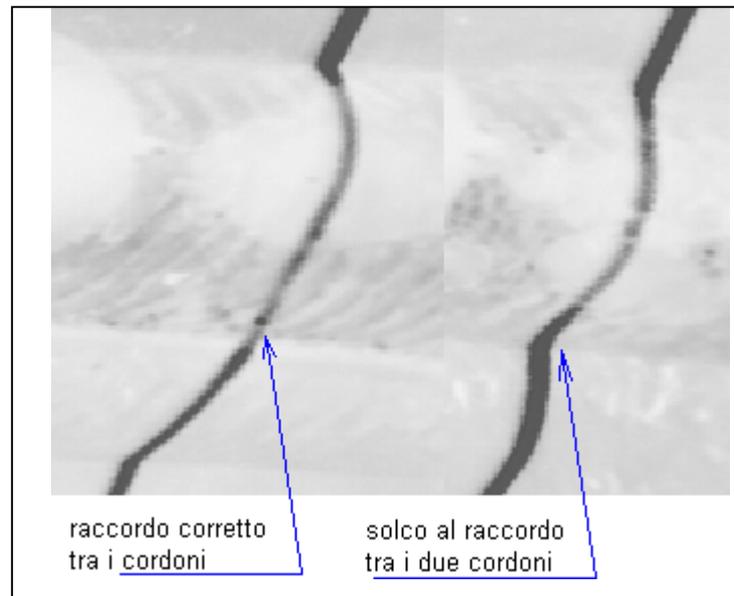


Figura 6.17: Irregolarità al raccordo tra due cordoni adiacenti: solco dovuto all'aumento dello stick off. Immagini n°. 55 e 658, tratte dalla sequenza 'Stick off+' (immagini a colori invertiti)

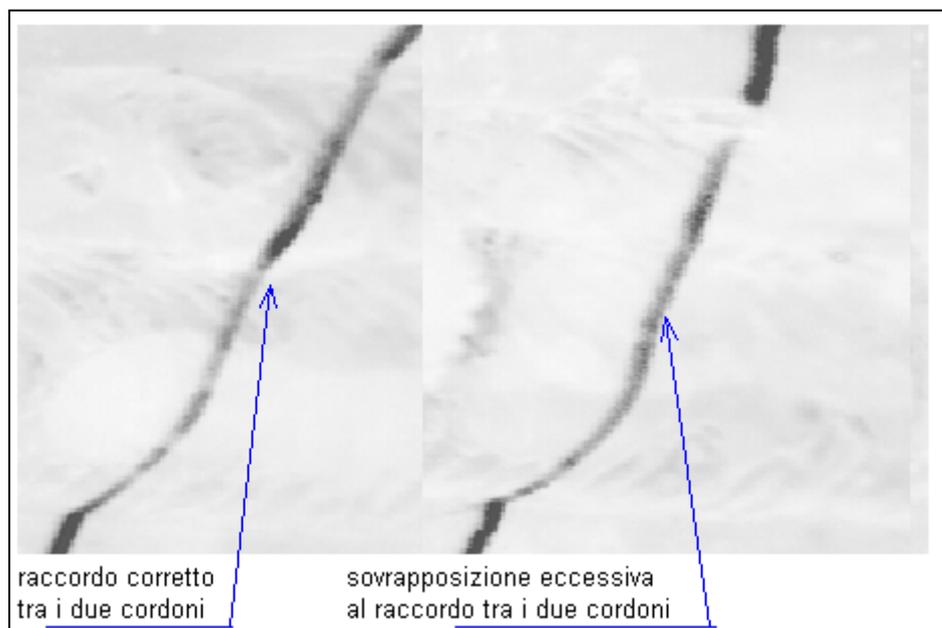


Figura 6.18: Irregolarità al raccordo tra due cordoni adiacenti: sovrapposizione eccessiva dovuta all'aumento dello stick off. Immagini n°. 96 e 520, tratte dalla sequenza 'Stick off-' (immagini a colori invertiti)

Un aumento dell'interasse dei cordoni durante la saldatura provoca un solco nella zona di raccordo tra due giunti adiacenti (caso di *stick off* crescente; si veda Figura 6.17). Una diminuzione dell'interasse dei cordoni durante la saldatura provoca una sovrapposizione eccessiva (caso di *stick off* -; si veda Figura 6.18).

6.8- Correlazione tra feature e difetti del giunto

6.8.1- Introduzione

Al fine di realizzare un sistema che sia in grado, partendo dall'analisi dei profili estratti da una sequenza, di segnalare la presenza di eventuali difetti del cordone, è necessario innanzitutto selezionare, tra le caratteristiche geometriche del profilo (*feature*), quelle correlate con ciascuno dei difetti descritti nel paragrafo precedente ed elencati nella Tabella 3.2 del Capitolo 3 sulla tipologia di saldatura svolta presso l'Ansaldo.

In alcuni casi il legame tra il difetto e una certa feature è subito evidente; in altri è possibile ipotizzare che una feature sia indicativa di un difetto e provare poi la validità del legame plottando i valori numerici relativi alla feature in questione per tutti i profili di una sequenza ed osservando se il loro andamento è correlato con il manifestarsi del difetto. I valori di soglia della caratteristica in esame superati i quali è probabile la presenza del difetto vanno stabiliti mediante l'analisi di un numero significativo di sequenze, registrando i valori assunti dalle feature in corrispondenza del difetto.

Nella scelta delle feature da tenere sotto controllo, occorre considerare che quelle di carattere globale, come ad esempio aree, perimetri ecc., sono più affidabili di quelle di tipo puntuale, in quanto meno sensibili ai disturbi.

In Tabella 1 sono riportati i difetti analizzati e le diverse feature proposte per rilevarli.

Gli algoritmi per il calcolo delle feature sono stati sviluppati in ambiente Matlab, realizzando la comunicazione con il software di analisi dell'immagine e controllo sviluppato in Visual Basic (si veda il paragrafo 4.6- *Comunicazione tra l'ambiente Matlab e il programma Visual Basic*).

6.8.2- I feature points

Sono così chiamati in letteratura [2] quei punti che, sul profilo, rappresentano il confine tra il cordone e la superficie del pezzo o del cianfrino (si veda la Figura 6.19).

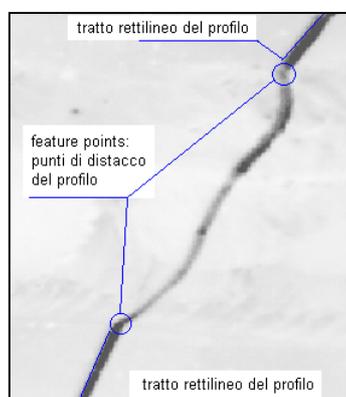


Figura 6.19: Individuazione dei *feature point*, ovvero dei punti di distacco del profilo

Causa	Difetto atteso	Descrizione visiva (immagini hot)	Descrizione visiva (immagini cold)	Feature cold
Diminuz. velocità di avanzamento	Aumento delle dimensioni del cordone	Aumento dell'area della pozza	Allargamento e innalzamento del profilo del giunto	Aumento area sezione + spostamento massimo+aumento massimo
Aumento velocità di avanzamento	Diminuzione delle dimensioni del cordone	Diminuzione dell'area della pozza	Diminuzione e abbassamento del profilo del giunto	Diminuzione area sezione + spostamento massimo + diminuzione massimo
Diminuz. di stick out	Irregolarità dell'altezza e convessità del cordone	Diminuzione della lunghezza d'arco	Eccesso/difetto di deposizione (cordone più o meno in rilievo)	Variazione di altezza del cordone
Aumento di stick out	Irregolarità dell'altezza e convessità del cordone	Aumento della lunghezza d'arco	Eccesso/difetto di deposizione (cordone più o meno in rilievo)	Variazione di altezza del cordone
Diminuz. di stick off	Ricoprimento eccessivo di due cordoni adiacenti	-	Sovrapposizione tra due cordoni adiacenti (v. Figura 2)	Aumento altezza massima del giunto+ avvicin. feat.point con massimo+ no variaz. dell'area tot. sezione
Aumento di stick off	Separazione al raccordo tra due cordoni adiacenti	-	Solco nella zona di separazione tra cordoni	Differenza tra max. e min. del profilo+no variaz. di area sezione
Assenza di gas protettivo	Ossidazioni o porosità	Variazioni dell'area e della forma dell'arco	Irregolarità di forma e luminosità del profilo: discount. di pendenza, riduz. massimo	Differenza tra max. e min. del profilo+dimin. area sezione oppure +diminuz. pendenza profilo al distacco dal piano

Tabella 6.1: Correlazione tra difetti del giunto e feature del profilo

La loro individuazione sul profilo, necessaria per tutta una serie di misurazioni sulle caratteristiche geometriche del cordone, viene effettuata direttamente dal software sviluppato in Visual Basic.

6.8.3- Interpolazione del profilo del giunto

Il profilo ricostruito (si veda il paragrafo 6.5- *Problemi relativi alla fase di binarizzazione. Logica di ricostruzione del profilo del giunto*) presenta notevoli irregolarità che rendono difficoltosa la successiva estrazione di feature adatte al riconoscimento di difetti del cordone saldato. Tali irregolarità sono dovute ad errori inevitabilmente condotti nelle fasi di acquisizione ed estrazione del profilo e che dipendono solo dall'hardware utilizzato. In altre parole, attraverso tali fasi si trasforma l'andamento continuo del profilo in una funzione discreta che, in questo caso, risulta avere una pendenza notevolmente discontinua. Per poter analizzare un profilo maggiormente rappresentativo del cordone si è quindi introdotta una fase di interpolazione dei punti del profilo ricostruito con una funzione polinomiale di grado opportuno. Tale funzione permette di ricostruire l'andamento originario del profilo del giunto e di identificare agevolmente tutti i suoi punti maggiormente caratteristici. In Figura 6.20 si riporta quindi un esempio dell'interpolazione descritta.

L'esempio riportato in Figura 6.20 è rappresentativo dell'intera casistica di immagini analizzate. I risultati mostrano che l'interpolazione consente effettivamente di:

- ricostruire fedelmente la geometria originaria;
- ricavare agevolmente, e con maggiore precisione, caratteristiche quali posizione e ordinata dei punti di massimo e minimo del profilo;
- calcolare feature, quali l'area sottesa dal profilo, mediante semplici operazioni matematiche effettuate su polinomi.

Dall'analisi sperimentale dei dati ottenuti si è inoltre potuto apprezzare un ulteriore vantaggio dell'analisi condotta sui profili interpolati, ossia la riduzione del rumore inevitabilmente presente sugli andamenti delle feature ricavate.

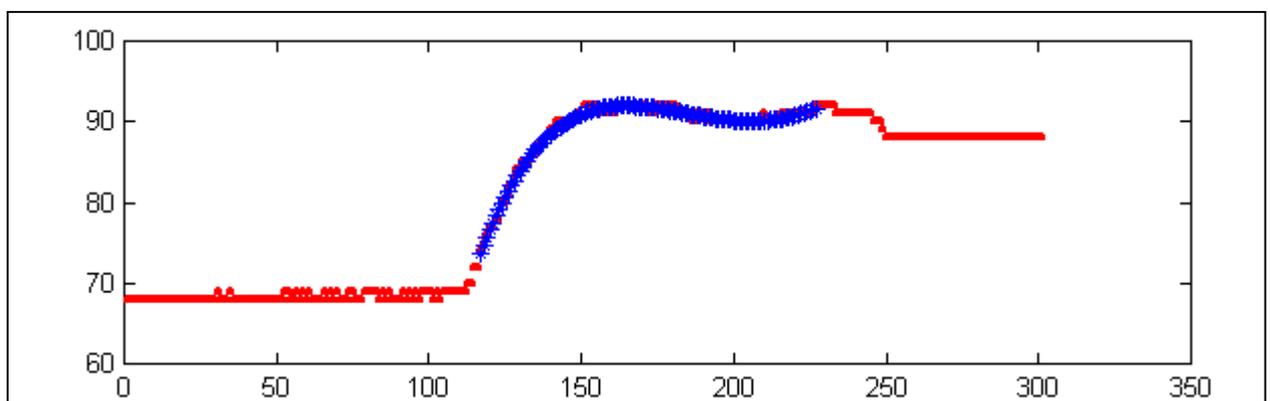


Figura 6.20: I punti del profilo estratto (rappresentati in rosso) sono interpolati mediante la funzione polinomiale rappresentata in azzurro.

6.8.4- Stick off

Il difetto denominato 'stick off' consiste nella mancanza di parallelismo tra due cordoni adiacenti. In particolare potrebbe accadere che gli assi dei due cordoni (quello in esecuzione e quello precedente) possano essere divergenti o convergenti, come mostrato nelle Figure 6.17 e 6.18.

Per tenere sotto controllo tale possibile difetto, si è pensato di calcolare la distanza (misurata in ordinata) tra il punto di massimo del profilo della saldatura in esecuzione ed il punto di intersezione dello stesso profilo con quello adiacente. In Figura 6.21 è riportata la sezione di un giunto, per rendere maggiormente chiaro quanto descritto.

La distanza 'd' è dipendente dalla distanza tra i due giunti adiacenti. Un eventuale errore di parallelismo tra gli assi di due giunti adiacenti porta, infatti, inevitabilmente ad una variazione della grandezza 'd'. Tenendo quindi sotto controllo tale grandezza è possibile misurare indirettamente l'errore di parallelismo. Dalle prove effettuate si è però notato che il calcolo della grandezza 'd' permette di rilevare con buona efficacia la 'divergenza' ma meno la 'convergenza' dei due cordoni. Da una analisi più dettagliata è emerso che questo problema nasce dalla difficoltà di identificare con sufficiente precisione l'ordinata del punto di intersezione dei due profili (il punto di minimo di Figura 23) nel caso l'interasse tra i due cordoni sia eccessivamente ridotto. Conseguentemente, la misura di 'd' impedisce un'inequivocabile identificazione del difetto nel caso i due cordoni fossero convergenti.

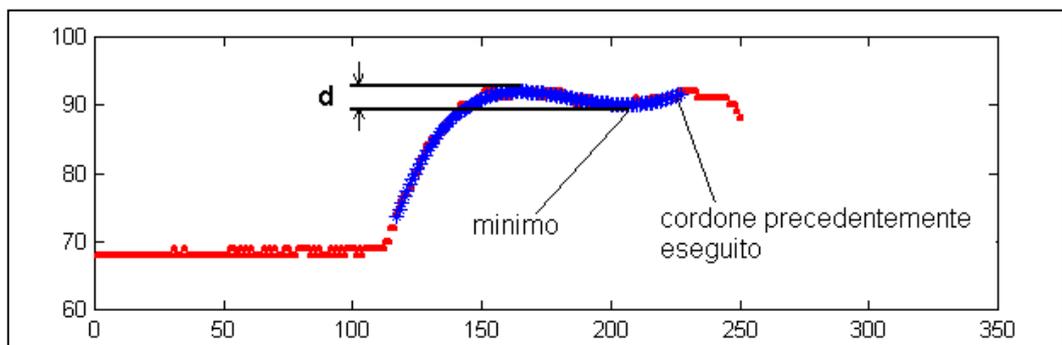


Figura 6.21: La feature 'd' permette di rilevare un eventuale mancato parallelismo (divergenza o convergenza dei giunti) tra due cordoni adiacenti.

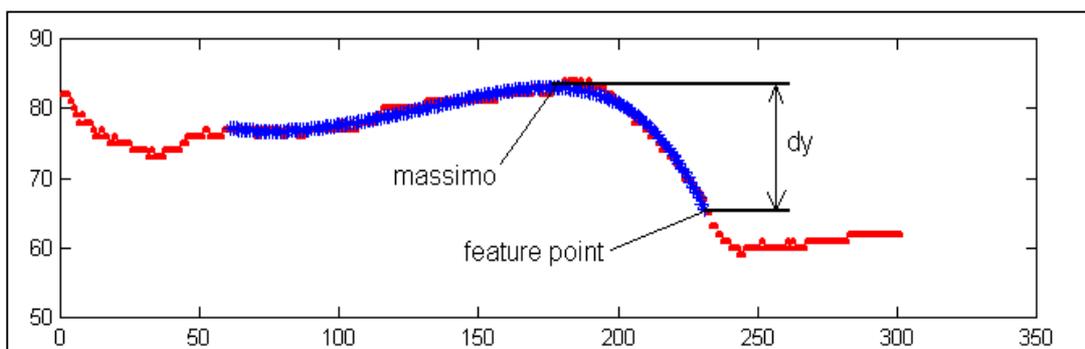


Figura 6.22: La feature dy permette di rilevare la eventuale convergenza dei cordoni.

Mediante la stessa analisi è stato però possibile effettuare una ulteriore considerazione; controllando la distanza, ancora misurata esclusivamente sulle ordinate, tra il punto di massimo del profilo del giunto in esecuzione ed il feature point evidenziato in Figura 6.22, è possibile avere una accurata misura sia della convergenza che della divergenza dei due cordoni. In particolare, tale misura è risultata particolarmente efficace per rilevare la convergenza; nei confronti della divergenza la sua sensibilità risulta inferiore, ma risulta comunque un valido strumento in appoggio alla feature 'd' per la rilevazione della divergenza dei giunti. Il grafico di Figura 6.23 illustra l'andamento della feature 'd' nel caso della sequenza di saldatura 'Stick off+', con assi dei cordoni divergenti: si osserva come, all'aumentare del distacco degli assi dei cordoni, anche il valore della feature aumenta (a partire dall'immagine n°. 240 circa).

Nel grafico di Figura 6.24 è illustrato l'andamento della feature 'dy' nel caso della sequenza 'Stick off-': è evidente come l'aumento del valore di 'dy' indichi la convergenza dell'asse dei cordoni e, quindi, la loro eccessiva sovrapposizione.

b

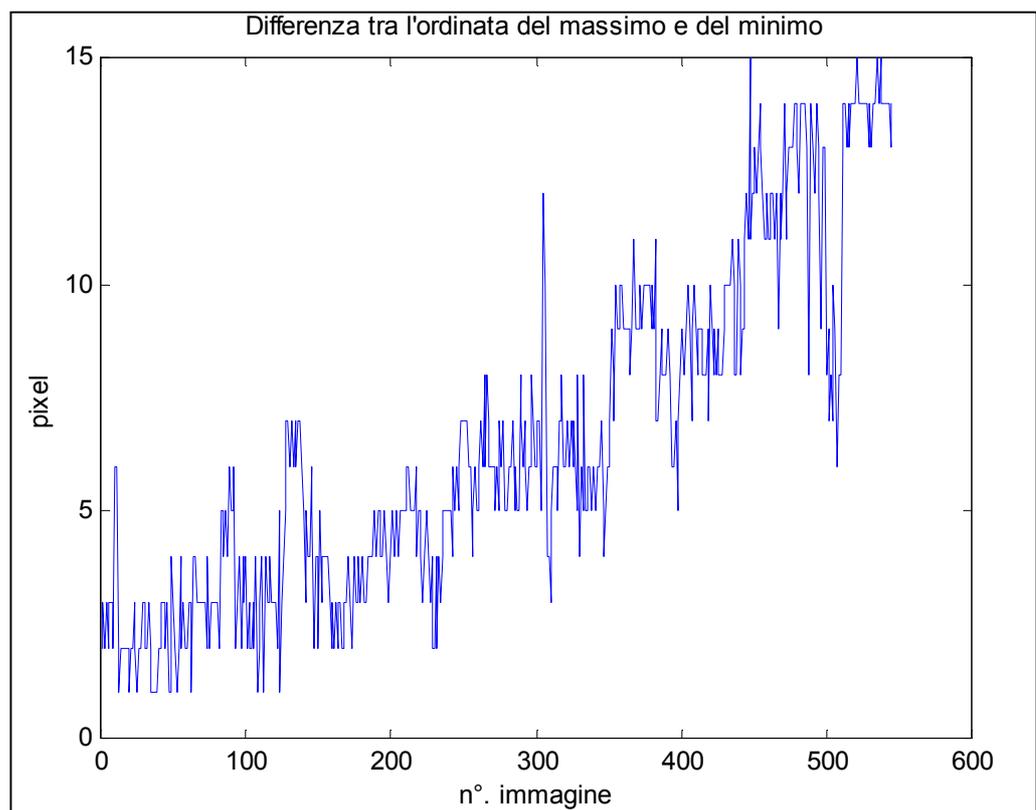


Figura 6.23: Grafico dell'andamento della differenza di ordinata tra massimo e minimo del profilo, 'd', nella sequenza 'Stick off+'

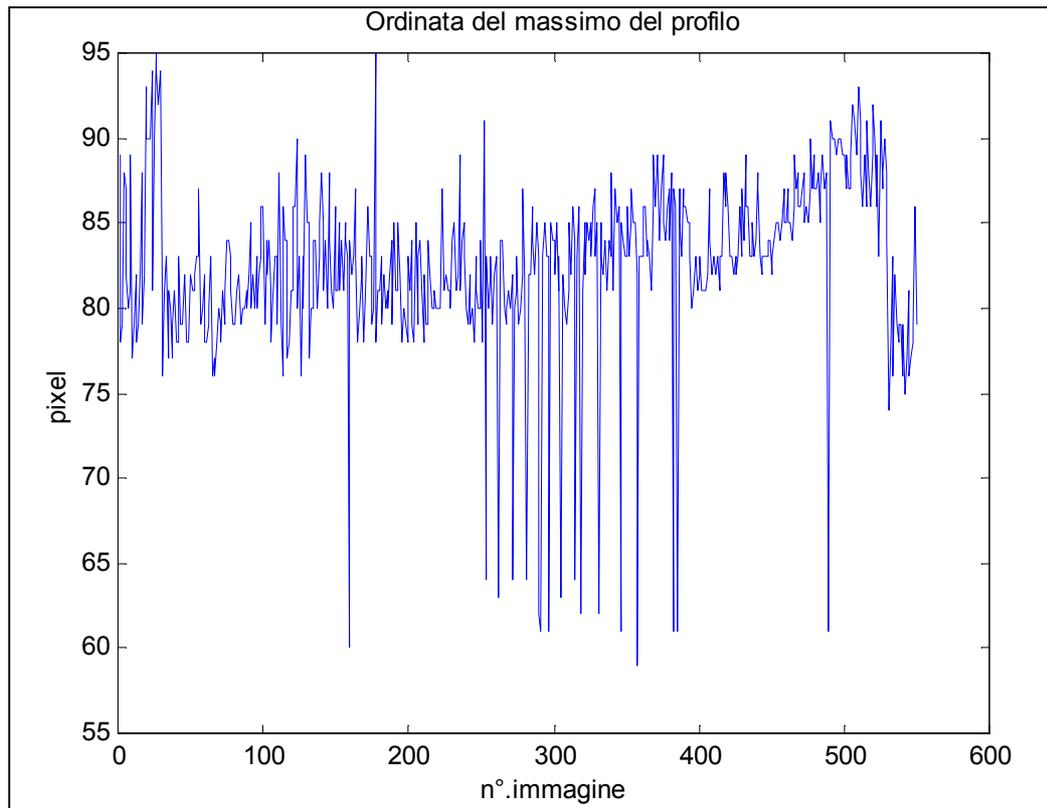


Figura 6.24: Grafico dell'andamento della feature 'dy', ordinata del massimo del profilo riferito alla quota del feature point

6.8.5- Airjet

La presenza di porosità e ossidazioni (v. par. 6.7.1- *Porosità e ossidazioni*) rende il profilo notevolmente irregolare ed asimmetrico, come mostrato con l'esempio di Figura 6.25.

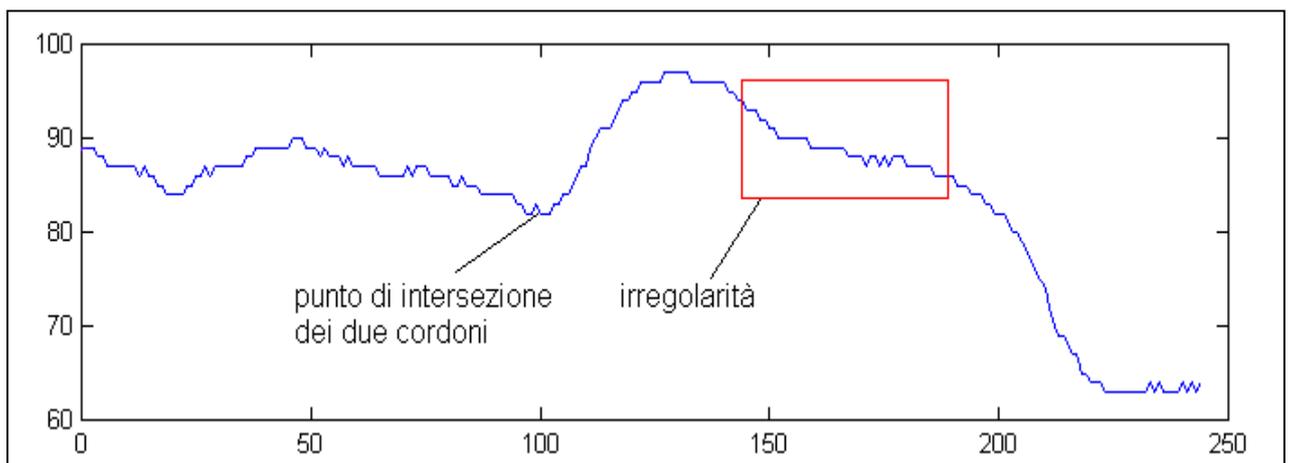


Figura 6.25: Rappresentazione dell'irregolarità del profilo causata dalla presenza di una ossidazione.

In Figura 6.26 è evidenziata l'irregolarità del profilo laser dovuta alla presenza del fenomeno dell'ossidazione. La chiara asimmetria del cordone e la notevole

irregolarità dell'andamento della sua pendenza rendono il profilo laser notevolmente dissimile dal profilo ideale.

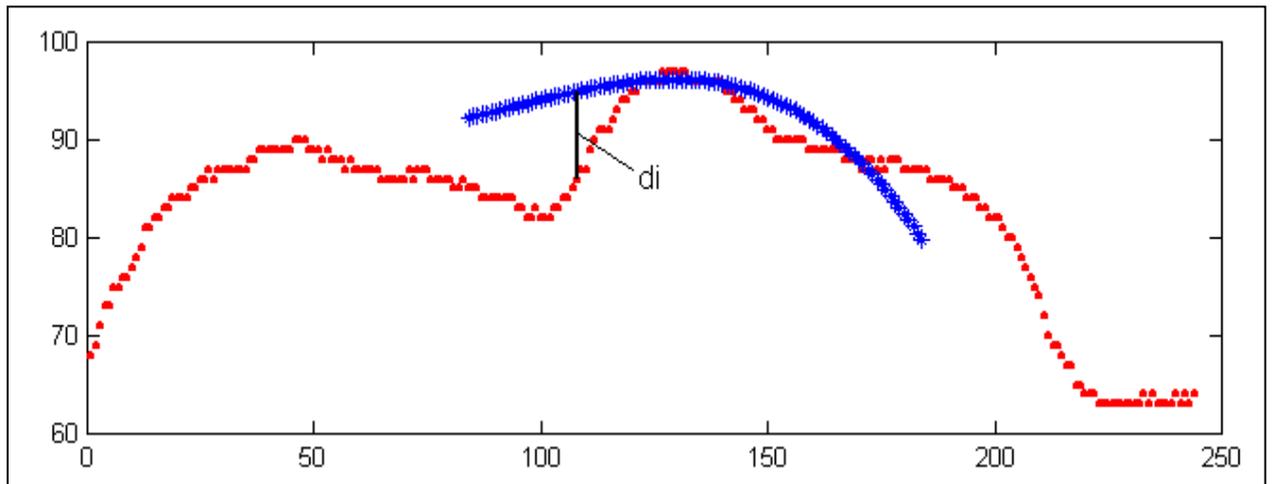


Figura 6.26: La somma dei quadrati delle distanze d_i fornisce una indicazione sulla presenza di porosità e ossidazioni.

Per rilevare tale difetto si è quindi pensato di interpolare i punti del profilo laser con una funzione polinomiale di terzo grado e di calcolare la somma dei quadrati delle distanze (vedere Figura 6.26) dei punti della funzione interpolante da quelli del profilo laser estratto.

La somma ('S') dei quadrati delle distanze d_i è quindi la feature in grado di rilevare la presenza di porosità e ossidazioni. In assenza di queste il profilo risulta infatti 'abbastanza' ben approssimato da una funzione polinomiale di terzo grado. Le irregolarità introdotte dalla presenza di porosità o ossidazioni rendono invece il profilo del giunto scarsamente approssimabile da tale funzione polinomiale, con conseguente aumento della somma S.

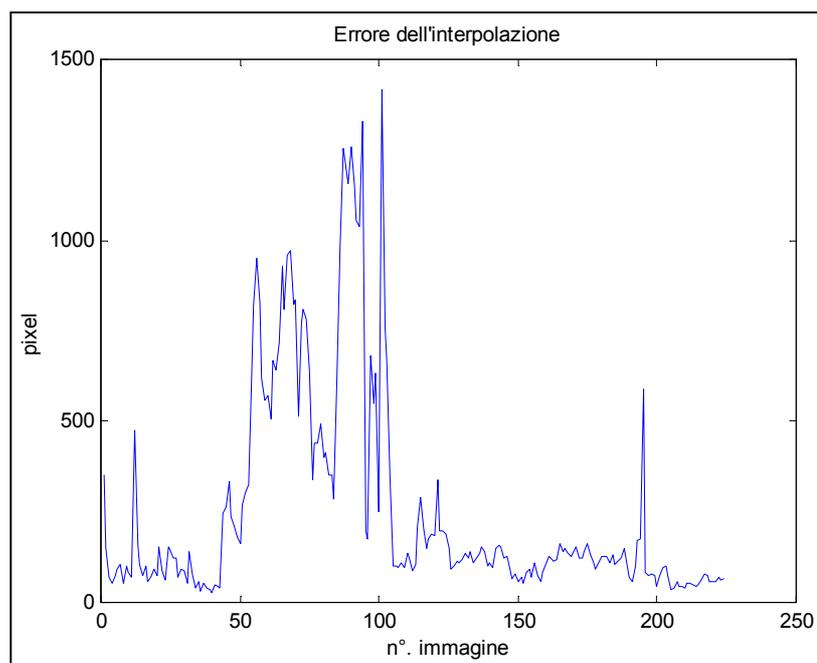


Figura 6.27: Andamento della feature 'fitdist', errore dell'interpolazione

In Figura 6.27 si riporta l'andamento della feature 'fitdist', che illustra la deviazione del profilo interpolato dal profilo reale: si nota che nel tratto dall'immagine 40 alla 110, circa, il valore di 'fitdist' ha un deciso aumento. Tale zona coincide con l'allontanamento del gas di protezione della saldatura.

6.8.6- Area della sezione del giunto

L'aumento o la diminuzione della velocità di avanzamento provocano variazioni delle dimensioni del giunto come illustrato nel paragrafo 6.7.2.

La feature 'area', che rappresenta l'area della sezione del giunto, è un'indicazione della regolarità delle dimensioni del cordone e della variazione di alcuni parametri di saldatura, in particolare la velocità di avanzamento.

Nel caso della saldatura Ansaldo, in cui non è possibile riconoscere i due estremi di un cordone, a causa dell'affiancamento e della parziale sovrapposizione con altri cordoni già depositi (si veda Figura 6.13). Per questo motivo, l'area della sezione del giunto non viene calcolata interamente, ma solo per metà: si tratta dell'area sottesa dalla porzione di profilo che va dal feature point al punto di massimo.

I grafici dell'andamento della feature 'area' per le sequenze di saldatura 'Velocity+' e 'Velocity-' sono riportati nelle Figure 6.28 e 6.29: si osserva l'aumento dell'area nel caso di velocità di avanzamento decrescente, e viceversa.

Nel grafico di Figura 6.28, l'aumento dell'area diventa significativo a partire dall'immagine 450, circa; l'oscillazione del valore della feature nel tratto iniziale (immagini 1 – 270 circa) è dovuto agli errori dell'estrazione del profilo dalle immagini.

Nel grafico di Figura 6.29, la diminuzione del valore della feature a causa dell'aumento della velocità di avanzamento diventa evidente a partire dall'immagine 410 circa.

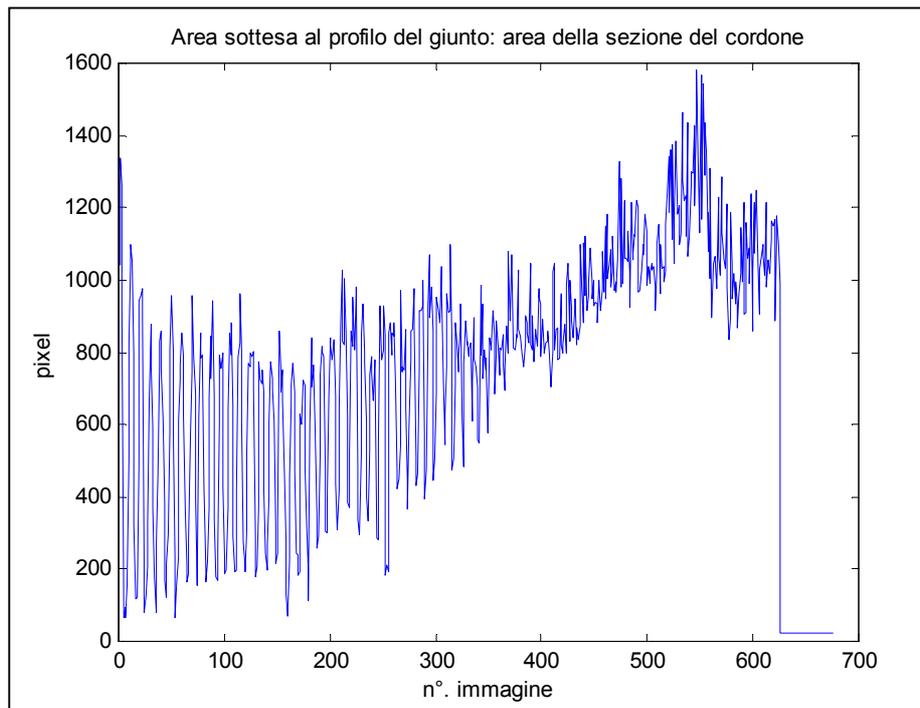


Figura 6.28: Andamento della feature 'area' per la sequenza di saldatura 'Velocity-'

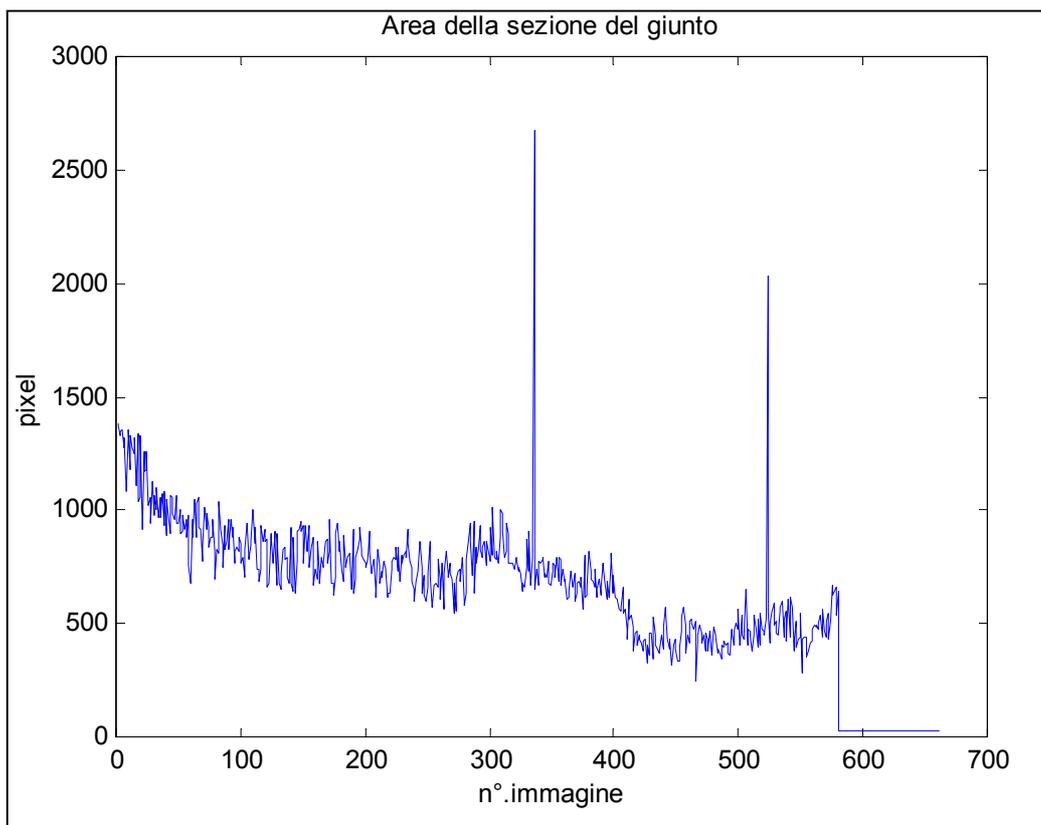


Figura 6.29: Andamento della feature 'area' per la sequenza di saldatura 'Velocity+'

6.8.7- Semilarghezza del giunto

Le dimensioni del giunto sono legate all'andamento della velocità di avanzamento, come descritto nel paragrafo 6.7.2.

Come l'area della sezione del giunto, anche la larghezza è un parametro geometrico legato alla variazione della velocità di avanzamento: la larghezza del giunto diminuisce al crescere della velocità.

La feature calcolata è la distanza orizzontale tra il feature point e il massimo del profilo, cioè la semilarghezza del giunto: infatti, non è possibile identificare con precisione la posizione del secondo estremo del profilo del giunto, dove avviene il raccordo con il cordone adiacente.

Le Figure 6.30 e 6.31 riportano l'andamento della semilarghezza del cordone per le sequenze di saldatura 'Velocity-' e 'Velocity+': nel primo grafico si osserva che la semilarghezza aumenta evidentemente a partire dall'immagine 430 circa. Nell'altro grafico, la semilarghezza diminuisce a partire dall'immagine 410 circa.

6.8.8- Pendenza del profilo del giunto nel punto di distacco

Le variazioni di forma e dimensioni del cordone legate all'aumento o diminuzione di velocità, alla convergenza degli assi dei cordoni, all'allontanamento del gas di protezione, provocano uno schiacciamento o un innalzamento del cordone, che è rilevabile come variazione della pendenza del profilo nel punto di distacco, oltre che come variazione del massimo del profilo.

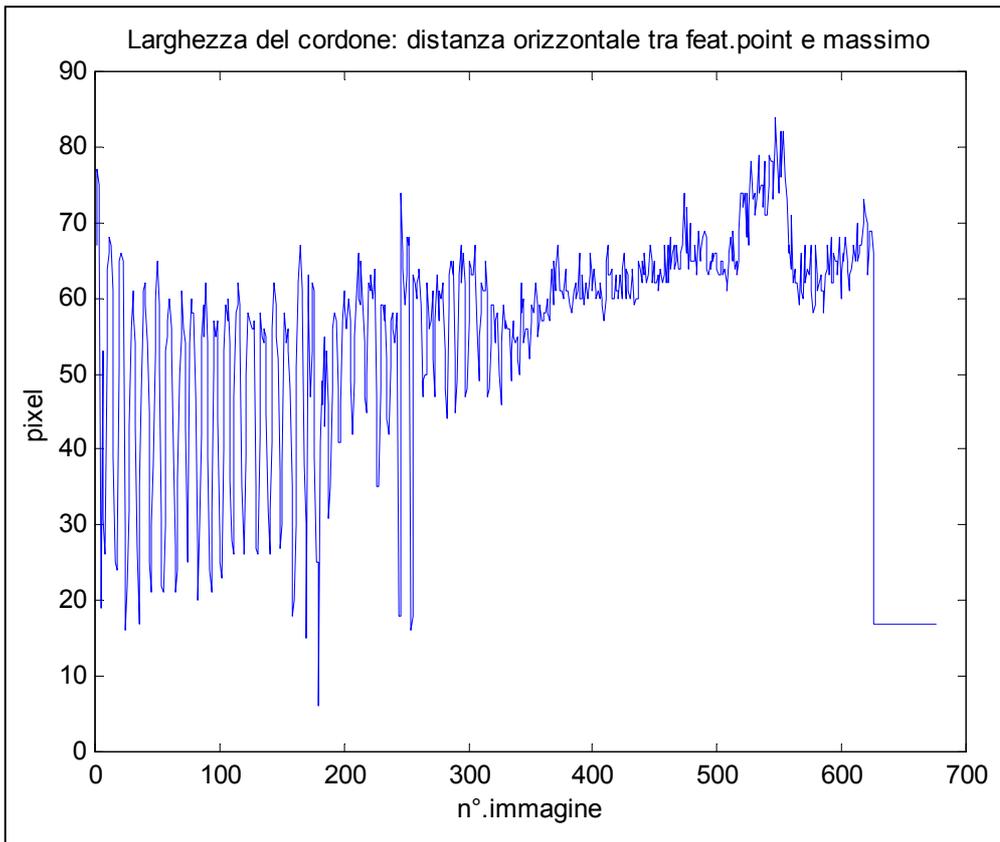


Figura 6.30: Grafico dell'andamento della semilarghezza del cordone per la sequenza di saldatura 'Velocity-'

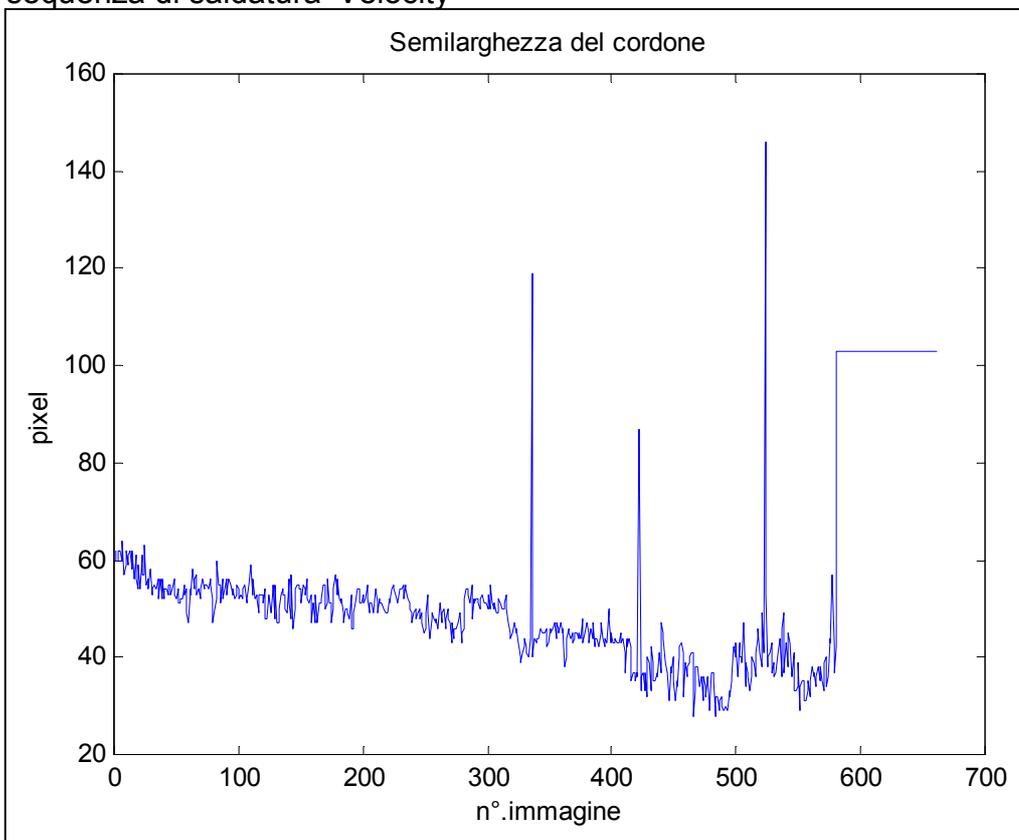


Figura 6.31: Grafico della semilarghezza del cordone per la sequenza 'Velocity+'

Si osserva come in corrispondenza del tratto delle immagini 50-100 circa la pendenza subisca una brusca variazione: esso corrisponde al tratto di profilo irregolare a causa dell'allontanamento del gas protettivo.

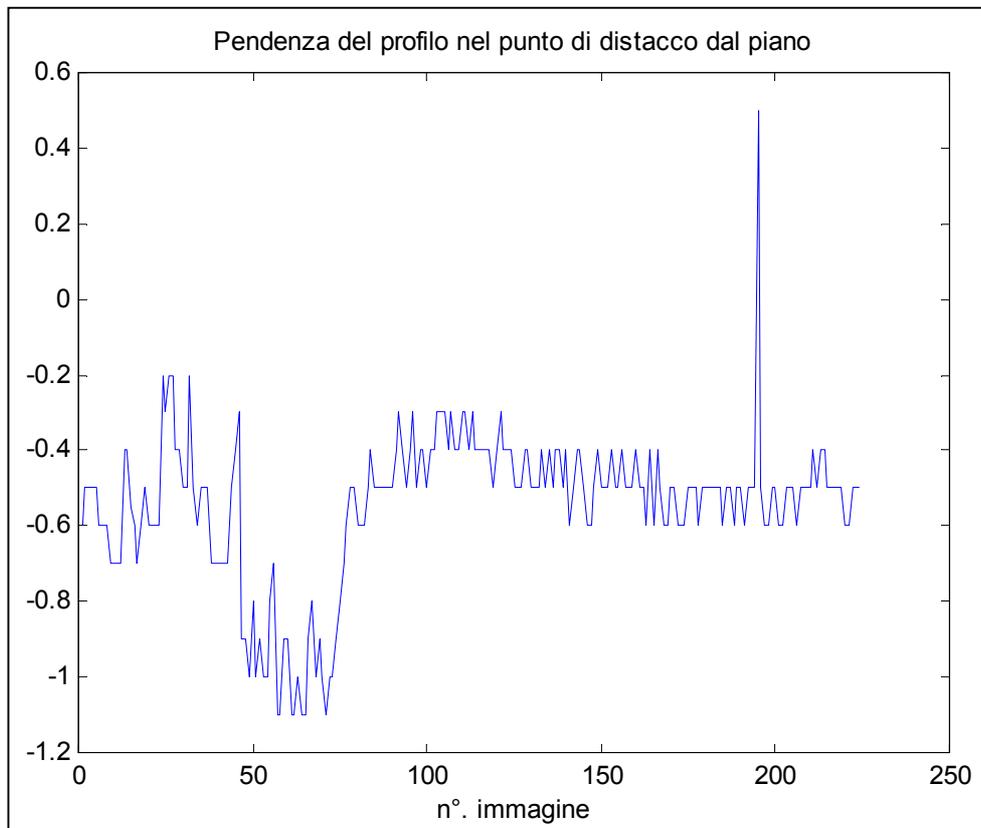


Figura 6.32: Grafico dell'andamento della pendenza del cordone nel punto di distacco per la sequenza 'Airjet'

6.9- Cause di variabilità dei dati

Tracciando i grafici dei dati relativi alle feature estratte, si osserva che l'andamento dei valori è affetto da disturbi di frequenza pari a quella d'acquisizione delle immagini. I grafici riportati in questa sezione (figure 24 a 34) evidenziano tale fenomeno.

È possibile identificare fonti di errore nei dati misurati in alcune fasi della procedura seguita a partire dalla binarizzazione delle immagini e dall'estrazione del profilo fino all'individuazione dei feature point.

Riguardo agli errori introdotti in fase di binarizzazione ed estrazione, si veda quanto detto precedentemente; a sua volta la ricostruzione delle discontinuità tramite il programma 'clean.m' è fonte di disturbi, poiché produce approssimazioni dell'andamento del profilo che talvolta si discostano sensibilmente dalla sua geometria reale.

Infine, l'algoritmo d'individuazione dei feature point ne fornisce le coordinate con un errore massimo di due pixel sull'ascissa e due sull'ordinata. Mediamente, ciò corrisponde ad un errore lineare di 0,6 mm. La causa principale di quest'errore

è il limite imposto dalla risoluzione delle immagini, che provoca incertezza nella determinazione della retta che interpola i punti della parete del cianfrino.

6.10- Discussione

Le feature proposte in Tabella 6.1 per il riconoscimento dei difetti del giunto sono state calcolate per cinque sequenze di saldatura (i grafici relativi sono riportati nella sezione 'Risultati sperimentali').

Tutte le feature proposte consentono di riconoscere i difetti e le irregolarità già rilevate con un'analisi visiva delle sequenze (v. le schede d'analisi allegate in appendice).

Tuttavia alcune presentano oscillazioni rispetto all'andamento medio che rendono talvolta complicata l'individuazione del punto d'inizio del difetto e, dunque, la scelta di una soglia di accettabilità per il valore della feature.

Si ipotizza la possibilità di individuare alcune feature che consentono di rilevare gli stessi difetti riportati in Tabella 8.2, in alternativa a quelle proposte:

- per il riconoscimento della variazione di dimensioni del cordone: l'area della sezione e la larghezza del giunto;
- per le irregolarità di raccordo tra cordoni: la differenza tra massimo e minimo relativo della linea del profilo.

7- Il controllo del processo

7.1 Introduzione

I difetti rilevabili sono stati descritti nel capitolo precedente riguardante lo sviluppo di algoritmi e relativi test sperimentali.

La capacità di rilevare non solo la presenza di un difetto ma anche la deriva di un parametro è utile sia nel controllo di qualità che in quello di processo. Nella valutazione delle grandezze esaminate ai fini del controllo, non interessa tanto il valore assoluto, quanto le variazioni percentuali: si assume che, dopo che sono stati impostati i parametri della saldatura per una sequenza, le caratteristiche prescelte delle immagini non dovrebbero mutare, oltre certi limiti prefissati se il processo rimane sotto controllo.

Nel caso in cui si registri una variazione significativa di un parametro, è previsto un intervento correttivo atto a riportare il sistema nelle condizioni ottimali o di progetto.

La correlazione tra presenza di difetti e parametri della saldatura è stata indicata nel capitolo relativo alla definizione e classificazione dei difetti (Capitolo 3. *Prove di saldatura: caso della placatura Ansaldo*).

Nei capitoli precedenti (Capitoli 5 e 6) sono stata indicate le feature più significative della pozza e del profilo del cordone per esprimere la presenza o l'insorgere di un difetto, pertanto risulta definito il parametro da correggere nel caso in cui una di tali feature esca dall'intervallo di accettabilità. Restano dunque aperti i seguenti problemi:

1. valutare l'entità della correzione in funzione dell'entità del difetto;
2. risoluzione di eventuali conflitti nel caso di una o più feature errate e nel caso di provenienza di input da sensori diversi che eventualmente coesistono con quello di visione, verso l'unità centrale di governo della saldatrice;
3. inglobare le singole verifiche descritte nel capitolo precedente in una parte del programma di controllo, di seguito descritto, di cui sono stati testati i singoli blocchi.

Per il test sperimentale globale è richiesta l'integrazione del sistema per poter eseguire i necessari controlli on-line e verificare che gli effetti siano quelli previsti.

Per il punto 1, in particolare, una possibile strategia di controllo consiste nella correzione del parametro che influenza maggiormente l'insorgenza del difetto in esame secondo le priorità indicate nella tabella sopra citata.

La strategia del controllo dipende da

- affidabilità con cui i difetti vengono rilevati dal sistema di visione, sul caldo e sul freddo;
- rilevanza del difetto.

L'intervento è stabilito di conseguenza per ciascun tipo di difetto.

Per quanto riguarda il punto 3, il problema consiste nel definire un albero delle decisioni che esaurisca la casistica dei difetti da verificare ad ogni acquisizione delle immagini. Tale problema è trattato nel paragrafo successivo.

Le variazioni dei parametri della saldatrice (corrente e tensione) possono essere monitorate e controllate direttamente e manualmente: non è presente, per il robot di saldatura Ansaldo, la possibilità di scambio di dati con il sistema di controllo, sia in ingresso che in uscita. Quindi anche la risposta correttiva del sistema all'insorgere di un difetto di saldatura non può essere direttamente tradotta in un segnale di ingresso

al robot, che provochi una variazione dei parametri del processo: il controllo fornisce solo un'indicazione al tecnico che segue la lavorazione, che manualmente interverrà sul robot.

Le variazioni dei parametri legate alla variazione della lunghezza dell'arco, possono essere dovute ad un'erronea impostazione del percorso della torcia o deformazioni del pezzo e vengono compensate entro un certo limite in base alla caratteristica elettrica della saldatrice. Oltre a tale valore possono essere rilevate per mezzo del sistema di inseguimento del cianfrino o in assenza di esso dal sensore di visione. L'intervento correttivo avviene sulla traiettoria seguita dal robot che sostiene la torcia.

7.2 Funzionamento del sistema di controllo automatico: fase di autoapprendimento e segnali di errore

Come detto nell'introduzione del capitolo e nel Capitolo 6, è importante la valutazione delle variazioni delle feature nel corso della sequenza di saldatura piuttosto che il loro valore assoluto: per stabilire che il valore di una feature esce dall'intervallo di valori accettabili, è necessario prima stabilire, per ogni feature, la posizione e l'ampiezza di questo intervallo.

Data una sequenza di saldatura, caratterizzata da parametri fissati; data una configurazione di montaggio del sensore e del robot di saldatura; sarà univocamente individuabile la geometria reale della pozza e del profilo del cordone, e il loro aspetto nelle immagini acquisite dal sensore.

Il funzionamento automatico del sistema di controllo richiede di conoscere queste caratteristiche: ciò avviene in una prima fase di *autoapprendimento* del sistema.

Durante l'autoapprendimento, una passata di saldatura viene realizzata a parametri fissati, sotto la supervisione del tecnico di saldatura, che verifichi la correttezza della lavorazione. In questa fase, le immagini acquisite vengono analizzate per calcolare le feature della pozza e del giunto: ciascuna feature non viene controllata, ma i suoi valori vengono memorizzati in un vettore di dati.

Al termine della passata di saldatura, per ciascuna feature F viene calcolato il valore medio, F_M , e la deviazione standard, σ_F . La fascia di accettabilità per ciascuna feature viene fissata a cavallo del valore medio e di ampiezza A pari ad un multiplo H della deviazione standard:

$$A = H \cdot \sigma_F$$

I limiti di accettabilità saranno F_{\min} e F_{\max} :

$$F_{\min} = F_M - A, \quad \text{e:} \quad F_{\max} = F_M + A.$$

Per illustrare il significato di quanto detto sopra, si faccia riferimento al grafico con l'andamento dell'area della sezione del giunto nel corso della sequenza di saldatura '*Velocity-*', già visto nel paragrafo 6.8.7, sul calcolo delle feature. In esso è possibile individuare un tratto in cui la feature si mantiene pressoché costante, corrispondente alla prima fase della lavorazione a parametri inalterati: in questo primo tratto è possibile individuare la fascia di accettabilità della feature.

Successivamente, al diminuire della velocità, si osserva una crescita anomala del valore dell'area, fino al superamento del limite superiore.

È importante osservare che il superamento dei limiti, sia superiore che inferiore, della fascia di accettabilità, avviene sporadicamente anche prima che l'andamento della feature sia monotonamente crescente: ciò è dovuto ad errori nel corso del

funzionamento del controllo, sia nell'acquisizione delle immagini, o nella binarizzazione, o nell'estrazione del profilo, o nel calcolo della feature stessa. Perciò il riconoscimento di un difetto avviene solo quando uno dei limiti venga superato dal valore della feature per un numero n di volte consecutive: normalmente, è $n = 8$.

Tutti i parametri del controllo sopra detti (F_M, σ_F, H, n , ecc.) possono essere modificati manualmente nella finestra di '*Advanced Control*' del programma *On-line Welding Control* (si veda il Capitolo 4 sulla struttura del software di controllo).

Il superamento, anche occasionale, del limite di accettabilità della feature viene segnalato dall'accensione di una spia rossa nella casella della feature stessa nella finestra di controllo, come già illustrato nel Capitolo 4: quando invece il limite viene superato per almeno n volte, anche la casella accanto si illumina di rosso, e si aziona un contatore che segnala il numero totale di volte per il quale il superamento della soglia di accettabilità si verifica.

7.3 Strategia del controllo

Per l'analisi del giunto freddo è possibile operare un controllo di tipo parallelo; ovvero tutte le feature calcolate sono monitorate contemporaneamente e senza stabilire una priorità di importanza tra di esse.

Non tutte le feature possono singolarmente essere indicative del verificarsi di un dato difetto: in alcuni casi, per individuare in modo univoco il verificarsi di un dato difetto si ricorre ad una combinazione di feature: per esempio, la diminuzione o l'aumento della velocità di avanzamento viene individuato quando contemporaneamente si verifichi un aumento o una diminuzione sia dell'area della sezione sia della semilarghezza del giunto. Possiamo chiamare *indicatore del controllo* ogni feature o combinazione di feature che sia indicativa per un dato difetto: dire che un *indicatore del controllo* sia fuori intervallo vuol dire che si è verificata la combinazione di condizioni che individuano un difetto.

Non appena uno degli indicatori del controllo è fuori intervallo, il controllo comunica il verificarsi del difetto relativo nella finestra generale del software *On-line Welding Control* (per esempio, '*decreasing velocity*' nel caso di una eccessiva diminuzione della velocità di avanzamento); insieme, nella stessa finestra, viene anche visualizzato l'indicatore che è uscito dall'intervallo di accettabilità (per esempio, '*area and width*' nel caso di velocità decrescente).

Di seguito si descrivono tutti gli indicatori del controllo che sono stati individuati e i difetti correlati a ciascuno di essi:

1. per porosità ed ossidazioni e, più in generale, per una irregolarità di forma del profilo, è sufficiente che si verifichi l'errore della feature 'fitdist' (feature del profilo del giunto, si veda paragrafo 6.8);
2. per l'irregolarità di raccordo tra due cordoni adiacenti dovuta alla divergenza degli assi di avanzamento della saldatura (stick off crescente), è sufficiente il superamento della soglia superiore per la feature 'd', differenza di ordinate tra il punto di massimo e di minimo del profilo (si veda il paragrafo 6.8), senza che si verifichi errore della feature 'fitdist' e della semilarghezza del cordone;
3. per l'irregolarità di raccordo tra due cordoni adiacenti dovuta alla convergenza degli assi di avanzamento della saldatura (stick off decrescente), è sufficiente il superamento della soglia superiore per la feature 'dy', ordinata del massimo del profilo rispetto alla quota del feature point; contemporaneamente la semilarghezza del cordone deve risultare inalterata;

4. per velocità crescente o decrescente, è sufficiente che sia l'area che la larghezza del giunto escano dai limiti di soglia (superamento della soglia superiore per velocità decrescente e della soglia inferiore per velocità crescente, si veda il paragrafo 6.8).

E' evidente la coerenza degli indicatori di controllo suddetti con le previsioni e le ipotesi di correlazione tra feature e difetti formulate nella Tabella 6.2 del Capitolo 6.

Non è stata verificata alcuna influenza della variazione del parametro stick out sulla forma del cordone. Si ipotizza e resta da verificare la correlazione tra aumento/diminuzione dello stick out e aumento/diminuzione della lunghezza dell'arco, che può essere misurata dalle immagini della pozza di saldatura.

La logica generale del controllo è illustrata nello schema di Figura 7.1.

TIPO DI DIFETTO	INDICATORE DEL CONTROLLO	MESSAGGIO SUL DIFETTO	MESSAGGIO SULLA FEATURE
Porosità ed ossidazioni	Fitdist > soglia	<i>Porosity</i>	<i>Interpolation error</i>
Solco al raccordo tra cordoni: assi divergenti	'd' > soglia AND 'fitdist' > soglia AND no errore larghezza profilo	<i>Joint separation</i>	<i>Joint max-min. distance</i>
Sovrapposizione di cordoni: assi convergenti	'dy' > soglia AND no errore larghezza profilo	<i>Joint convergence</i>	<i>Joint max. ordinate</i>
Aumento dimensioni cordone: velocità decrescente	area giunto > soglia AND semilarghezza giunto > soglia	<i>Decreasing velocity</i>	<i>Joint area and width</i>
Diminuz. dimensioni cordone: velocità crescente	area giunto < soglia AND semilarghezza giunto < soglia	<i>Increasing velocity</i>	<i>Joint area and width</i>
Stick out crescente o decrescente	lunghezza arco > soglia (da verificare)	<i>Increasing or Decreasing Arc Length</i>	<i>Arc Length</i>

Tabella 1: Albero delle decisioni per il funzionamento del controllo e descrizione dei messaggi di errore che il software fornisce.

8- Conclusioni

Nella fase precedente della ricerca (si veda la relazione relativa alla fase 2.3) è stata condotta un'analisi della regione di saldatura che ha consentito di stabilire:

1. le caratteristiche delle immagini da acquisire;
2. le modalità di acquisizione delle immagini;
3. la struttura generale del software per l'analisi delle immagini;
4. la logica degli algoritmi per l'estrazione delle feature dalle immagini acquisite;
5. la strategia del controllo del processo sulla base dei risultati dell'estrazione delle feature.

I risultati del lavoro relativi agli ultimi due punti suddetti sono specifici della tipologia di giunto e di saldatura prese in considerazione: passate di saldatura multiple per realizzare l'unione di due lamiere mediante giunto di testa; i lembi dei pezzi da saldare erano preparati con cianfrinatura.

I difetti relativi a questa tipologia di saldatura sono riportati in Tabella 8.1.

Sono state acquisite immagini della pozza di saldatura e del profilo del cordone illuminato con luce laser.

E' stato possibile estrarre informazioni di tipo geometrico dal cordone, correlabili con l'andamento dei parametri del processo.

In particolare è stato possibile rilevare:

- la presenza di porosità, difetto molto pericoloso;
- gli spruzzi sulla superficie del cordone;
- le variazioni delle dimensioni del cordone e la quantità di materiale depositato;
- la concavità del cordone e la relativa entità, indici di corretta fusione con il metallo base.
- l'asimmetria del giunto come indice della correttezza della traiettoria seguita.

L'analisi delle immagini della pozza fusa ha consentito la rilevazione di:

- dimensioni e forma della zona fusa;
- la quantità di spruzzi emessi;
- presenza di fumo;
- instabilità dell'arco.

Tali feature possono essere correlate ai parametri del processo attraverso una sperimentazione successiva con una maggiore sofisticazione del sistema di acquisizione.

I seguenti difetti sono risultati invece difficilmente visibili con le tecniche descritte e utilizzate:

- la presenza di scoria nel bagno risulta mascherata dalla presenza di riflessi e onde sulla superficie. L'analisi della presenza di scoria si potrà perseguire raccogliendo immagini in applicazioni in cui la quantità di scoria presente nel bagno è maggiore;
- la fluidità del bagno è un indice di bagnabilità e richiede l'analisi di sequenze di immagini.

Il rilevamento delle incisioni marginali richiede la raccolta di nuovi dati sperimentali con cambiamenti della configurazione del sistema (saldature d'angolo).

E' stata definita una possibile strategia di controllo che include la sequenza di ricerca dei difetti indicati, in base alla gravità e all'affidabilità del riconoscimento.

Gli algoritmi sviluppati possono essere ottimizzati per operare in tempo reale con gli accorgimenti illustrati e implementati nel sistema finale con l'hardware prescelto.

Non è stato possibile dedurre, dall'analisi delle immagini, informazioni sulla modalità di trasferimento, se cioè si stia operando in short o spray arc, dato che la frequenza del fenomeno è molto più elevata di quella di acquisizione per cui non è possibile "contare" le gocce o valutarne la velocità. Il metodo più adatto per ottenere tale informazione può essere costituito da una semplice analisi acustica. Esempi dell'impiego di tale metodo sono presenti in letteratura.

La fase attuale ha avuto come obiettivo la realizzazione di un sistema dimostrativo di controllo della saldatura. L'oggetto è stato una particolare tipologia di processo, ovvero la deposizione di strati metallici protettivi per mezzo della saldatura sulla superficie di lamiere in acciaio (tipologia di saldatura Ansaldo, si veda il Capitolo 3). Relativamente a questa lavorazione, è stata raccolta una nuova casistica dei difetti riscontrabili nelle applicazioni tipiche: essi sono illustrati in Tabella 8.2.

Il sistema già sviluppato è stato potenziato e reso più efficiente sia nella sua parte hardware che software. Inoltre è stata realizzata l'integrazione con il sensore per l'acquisizione delle immagini progettato e realizzato da RTM (si vedano il Capitolo 2 sulla descrizione della struttura dell'hardware e il Capitolo 4 sulla struttura del software e sulla comunicazione tra i due sistemi, Qualital ed RTM).

Le nuove immagini acquisite sono state utilizzate per la messa a punto e il test dei programmi di elaborazione, estrazione delle feature e di controllo (si vedano i Capitoli 5 e 6 sull'analisi delle immagini della pozza e del profilo del cordone).

Infine una strategia del controllo è stata concepita (si veda il Capitolo 7), basata su una tabella di decisioni, la quale lega l'andamento dei valori delle feature estratte dalle immagini al rilevamento di un dato difetto di saldatura. Tutti i difetti della casistica formulata sono riconoscibili dall'analisi delle immagini di saldatura, tranne l'aumento/diminuzione di stick out, che potrebbe essere rilevato dall'elaborazione delle immagini della pozza di saldatura (la verifica resta da compiere): la logica di funzionamento del controllo è rappresentata nello schema di Figura 7.1 nel Capitolo 7.

	Corrente	Tensione	Velocità di avanzam.	Stick out	Stick off
<i>Mancanza di penetrazione</i>	Bassa	Bassa	Alta	Nessuna influenza	Nessuna influenza
<i>Incollatura</i>	Bassa	Bassa	Alta	Nessuna influenza	Nessuna influenza
<i>Cricche</i>	Alta	Alta	Bassa	Nessuna influenza	Nessuna influenza
<i>Incisioni marginali</i>	Alta	Alta	Bassa	Alto	Alto
<i>Porosità</i>	Alta	Alta	Alta	Alta	Nessuna influenza
<i>Eccesso di penetrazione</i>	Alta	Alta	Bassa	Nessuna influenza	Nessuna influenza
<i>Eccesso o difetto di sovrametallo</i>	Alta o bassa	Alta o bassa	Bassa o alta	Nessuna influenza	Nessuna influenza
<i>Inclusioni di scoria</i>	Bassa	Bassa	Alta	Nessuna influenza	Nessuna influenza
<i>Smagliature</i>	Nessuna influenza	Nessuna influenza	Alta	Nessuna influenza	Alto

Tabella 8.1: Dipendenza dei difetti del giunto saldato dai parametri di processo (per i parametri di maggiore influenza la correlazione è indicata in grassetto)

Causa	Difetto atteso	Descrizione visiva (immagini hot)	Descrizione visiva (immagini cold)	Feature cold
Diminuz. velocità di avanzamento	Aumento delle dimensioni del cordone	Aumento dell'area della pozza	Allargamento e innalzamento del profilo del giunto	Aumento area sezione + spostamento massimo+aumento massimo
Aumento velocità di avanzamento	Diminuzione delle dimensioni del cordone	Diminuzione dell'area della pozza	Diminuzione e abbassamento del profilo del giunto	Diminuzione area sezione + spostamento massimo + diminuzione massimo
Diminuz. di stick out	Irregolarità dell'altezza e convessità del cordone	Diminuzione della lunghezza d'arco	Eccesso/difetto di deposizione (cordone più o meno in rilievo)	Variazione di altezza del cordone
Aumento di stick out	Irregolarità dell'altezza e convessità del cordone	Aumento della lunghezza d'arco	Eccesso/difetto di deposizione (cordone più o meno in rilievo)	Variazione di altezza del cordone
Diminuz. di stick off	Ricoprimento eccessivo di due cordoni adiacenti	-	Sovrapposizione tra due cordoni adiacenti (v. Figura 2)	Aumento altezza massima del giunto+ avvicin. feat.point con massimo+ no variaz. dell'area tot. sezione
Aumento di stick off	Separazione al raccordo tra due cordoni adiacenti	-	Solco nella zona di separazione tra cordoni	Differenza tra max. e min. del profilo+no variaz. di area sezione
Assenza di gas protettivo	Ossidazioni o porosità	Variazioni dell'area e della forma dell'arco	Irregolarità di forma e luminosità del profilo: discont. di pendenza, riduz. massimo	Differenza tra max. e min. del profilo+dimin. area sezione oppure +diminuz. pendenza profilo al distacco dal piano

Tabella 8.2: Correlazione tra difetti del giunto e feature del profilo

