

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**SVILUPPO DI UN SISTEMA DI VISIONE PER LA VERIFICA
DI PARAMETRI DIMENSIONALI IN PROCESSI DI
STAMPAGGIO A FREDDO**

**DEVELOPMENT OF VISION SYSTEMS FOR THE CONTROL OF
ACCURACY IN SHEET METALFORMING**

Relatore: Prof. Andrea Ghiotti

Laureando: Paolo Conte

ANNO ACCADEMICO 2013/2014

Sommario

Oggi giorno la linea di tendenza industriale è volta a dare sempre maggiore attenzione alla riduzione degli sprechi e di conseguenza alla riduzione dei lotti produttivi con la finalità di produrre solo lo stretto necessario.

Diventa quindi di fondamentale importanza la fase iniziale di progettazione della produzione, eseguita spesso tramite codici di simulazione numerica del processo, nella quale si cerca l'ottimizzazione dei parametri di processo per consentire alla fase di produzione di ottenere la qualità richiesta su tutti i prodotti realizzati. Nel caso esaminato della forgiatura, per ottenere risultati di pregio in questa fase, sono necessari in input non solo i parametri reologici, geometrici, di attrito e di scambio termico, ma anche i parametri strutturali della pressa espressi tramite la sua rigidità.

Assume molto rilievo anche la possibilità di disporre di sistemi di misura "inline" per il monitoraggio dei parametri dimensionali durante la produzione. Nel caso della piegatura della lamiera infatti questi consentono la caratterizzazione e la correzione reattiva del fenomeno problematico del ritorno elastico, garantendo la qualità dei prodotti realizzati.

L'obiettivo della tesi è quello di trovare soluzione ad entrambi i problemi mediante un sistema di visione da applicare al caso della forgiatura per ricavare dati necessari per caratterizzare l'elasticità della pressa e alla piegatura della lamiera per il controllo in real-time dell'angolo di piega.

Il sistema messo a punto è stato tarato e testato per verificarne le potenzialità nelle applicazioni studiate.

Indice

CAPITOLO 1: Introduzione

- 1.1 Problema industriale e scientifico 1
- 1.2 Organizzazione del lavoro 3

CAPITOLO 2: Stato dell'arte

- 2.1 Progettazione di sistemi di visione per applicazioni industriali 5
- 2.2 Il ritorno elastico nella piegatura della lamiera 9
 - 2.2.1 Profili a singola curvatura; profili a doppia curvatura 12
 - 2.2.2 Metodi di controllo del ritorno elastico 15
- 2.3 Misura dell'elasticità di macchine per deformazione 17
 - 2.3.1 Metodi per la misura dello spostamento degli stampi 20

CAPITOLO 3: Apparato sperimentale

- 3.1 Telecamera AVT Prosilica GT1660: caratteristiche tecniche 23
- 3.2 Analisi delle prestazioni della telecamera: il frame rate 25

CAPITOLO 4: La piattaforma software: LabVIEW

- 4.1 Introduzione alla programmazione LabVIEW 31
- 4.2 Sistemi di visione: il modulo NI Vision 35
 - 4.2.1 Cenni sull'acquisizione di immagini digitali 36
 - 4.2.2 Introduzione alla programmazione: le librerie di NI Vision 40
 - 4.2.3 Edge Detection 43
 - 4.2.4 Geometric Matching 51
- 4.3 Descrizione dei programmi realizzati 56
 - 4.3.1 Angle Measure 57
 - 4.3.2 Find Marker 64
 - 4.3.3 Contour Extraction 69
- 4.4 Set-up Hardware e Software 73

CAPITOLO 5: Attività sperimentale

- 5.1 Misura dell'angolo di piega e del fattore di ritorno elastico nella piegatura della lamiera 79
 - 5.1.1 Ambiente di prova: macchina di carico universale MTS 80
 - 5.1.2 Set-up del sistema di misura 81

5.1.3	Principali fonti di errore del sistema di misura	84
5.1.4	Calibrazione dell'immagine	87
5.1.5	Taratura del sistema di misura	90
5.1.6	Campagna prove per determinare la sensibilità del sistema di misura	94
5.1.7	Campagna prove per il calcolo del fattore di ritorno elastico K	96
5.2	Misura dello spostamento relativo dei marker	97
5.2.1	Ambiente di prova: pressa a vite "Vaccari"	98
5.2.2	Set-up del sistema di misura	99
5.2.3	Principali fonti di errore del sistema	102
5.2.4	Campagna prove sulla MTS	103
5.2.5	Geometria dei provini	106
5.2.6	Campagna prove sulla pressa a vite	107
CAPITOLO 6: Analisi dei risultati		
6.1	Risultati prove di piegature della lamiera	113
6.1.1	Risultati della taratura e confronto	113
6.1.2	Presentazione risultati del calcolo del fattore di ritorno elastico K	128
6.2	Risultati prove dello spostamento relativo dei marker	131
6.2.1	Presentazione risultati delle prove su MTS	131
6.2.2	Presentazione risultati delle prove su pressa a vite	137
CAPITOLO 7: Conclusioni		145
Appendice A		
Creazione di un disco virtuale in Windows 8.1		149
Appendice B		
Creazione del modello del marker con il software NI Vision Template Editor		151
Appendice C		
Valutazione della sensibilità dell'ottica alla luminosità		155
Bibliografia		159

CAPITOLO 1

Introduzione

1.1 Problema industriale e scientifico

La situazione attuale di mercato richiede alle aziende di essere sempre più attente alla riduzione degli sprechi di materiale e alle condizioni di disponibilità delle macchine. Questo porta ad una forte riduzione dei lotti di produzione con la finalità di produrre solo lo stretto necessario. Per ottenere questo risultato le aziende tendono ad ottimizzare il più possibile i loro processi produttivi, cercando di essere sempre più efficienti e reattivi ai cambi di prodotto e cercando, soprattutto, di riuscire ad ottenere la qualità richiesta di tutti i prodotti realizzati.

Sulla base di questa esigenza poggia il lavoro svolto in questa tesi. Viene proposto, infatti, lo sviluppo di un sistema di misura che consenta il monitoraggio dei parametri dimensionali del prodotto durante il processo di formatura. L'analisi in real-time dei parametri dimensionali consente di verificare la conformità del prodotto e di inviare eventuali feedback per la correzione immediata delle variabili di processo che lo condizionano.

Il lavoro si è focalizzato sui processi di stampaggio a freddo, in particolare sulla piegatura della lamiera e sulla forgiatura a freddo.

Il processo di piegatura rappresenta uno dei più comuni e diffusi metodi di lavorazione delle lamiere. Sebbene questo possa sembrare estremamente semplice e di immediata esecuzione, nasconde una serie di problemi legati al complesso stato di sollecitazione e deformazione che induce all'interno dei componenti piegati. Risulta strategico quindi il controllo dell'angolo finale di piega su ognuno dei componenti realizzati al fine che questi rispettino le specifiche tecniche. Il principale problema che

si riscontra in questo processo, oltre ai limiti di formabilità del materiale, è quello del ritorno elastico (springback), ossia del parziale recupero della deformazione della lamiera una volta terminata la fase di carico. Questo fenomeno varia da lamiera a lamiera ed è influenzato dal tipo di materiale, dalle precedenti lavorazioni per deformazione plastica effettuate sulle lamiere da piegare, dalle differenze di comportamento legate agli stati di fornitura e alle esatte caratteristiche meccaniche e metallurgiche delle lamiere.

Si è cercato in questo lavoro di sviluppare un sistema di misura in grado di verificare l'angolo finale di piega in real-time. Lo scopo di questo sistema è quello di essere integrato alla macchina piegatrice per avere la possibilità di inviare dei feedback sui risultati trovati alla macchina, in modo da correggere in modo dinamico e reattivo i parametri di processo per la compensazione del fenomeno del ritorno elastico al variare della lamiera e dell'articolo realizzato.

Così facendo si otterrebbe un'efficace soluzione per il miglioramento della affidabilità e della qualità delle macchine piegatrici.

Sono state pensate soluzioni sia per configurazioni di piega più semplici, con profili a curvatura singola, sia soluzioni per configurazioni più complesse, con profili a curvatura doppia.

Per quanto riguarda la forgiatura, invece, il lavoro svolto rientra all'interno di un progetto che si prefigge come obiettivo quello del miglioramento della precisione durante il processo di formatura mediante la conoscenza dell'elasticità della macchina ottenuta attraverso il monitoraggio delle deflessioni della stessa.

Tra gli obiettivi primari dell'industria della forgiatura ci sono, infatti, l'ottenimento di tolleranze di lavorazione sempre più strette sui componenti ed il raggiungimento di una vita in servizio duratura delle attrezzature utilizzate. In particolare, geometrie complesse e non simmetriche dei pezzi generano carichi eccentrici determinando la deformazione della macchina e una conseguente perdita delle tolleranze e della precisione ottenibile. Le deformazioni del telaio della pressa sono il risultato della rigidità complessiva del sistema pressa-stampo-pezzo in lavorazione, rigidità che varia durante il processo di formatura a causa delle variazioni geometriche del componente.

Il ruolo del presente lavoro è quello di proporre una soluzione alternativa per il monitoraggio accurato degli spostamenti orizzontali degli stampi durante la forgiatura che serviranno al calcolo delle deflessioni che interagiscono simultaneamente sul sistema combinato pressa-stampo-pezzo.

Viene proposto quindi un sistema di misura real-time degli spostamenti, sia verticali che orizzontali, degli stampi che si verificano durante il processo di forgiatura.

1.2 Organizzazione del lavoro

Il lavoro è stato caratterizzato da una prima fase di formazione ed apprendimento del linguaggio di programmazione LabVIEW. Dapprima è stato realizzato lo studio in autonomia dei moduli *LabVIEW Core 1* e *LabVIEW Core 2* al fine di familiarizzare con il codice e di imparare le tecniche di programmazione. Successivamente lo studio si è concentrato sui moduli di LabVIEW riguardanti l'acquisizione di immagini e la loro analisi ed elaborazione. Questa parte si è poggiata sui manuali *NI Vision*, *Vision Concept Manual* e *IMAQ Vision for LabVIEW*.

Questa fase è stata svolta in parallelo all'attività di studio delle caratteristiche di set-up per la realizzazione di un sistema di visione.

La seconda parte del lavoro, spesso sovrapposta a quella di formazione, ha portato alla progettazione del sistema di visione e alla realizzazione dei programmi in LabVIEW. Questi sono stati realizzati con un'architettura che, oltre a rispettare i vincoli progettuali, fornisce delle soluzioni efficienti ai problemi affrontati nelle varie applicazioni. È stata affrontata anche l'analisi della strumentazione hardware a disposizione per determinarne le prestazioni, con particolare attenzione alla frequenza di acquisizione (frame rate), allo scopo di definire la configurazione ottimale che meglio rispondesse agli obiettivi delle singole applicazioni.

La fase successiva si è concentrata sulla progettazione delle configurazioni di prova per le applicazioni studiate e sulla valutazione delle principali fonti di errore da tenere in considerazione nella messa a punto del sistema di visione e durante l'esecuzione dei test.

Il lavoro è stato poi incentrato sulla progettazione e sullo sviluppo delle procedure di prova per la determinazione delle prestazioni dei sistemi messi a punto per la misura dell'angolo di piega e del fattore di ritorno elastico, nel caso della piegatura della lamiera, e dello spostamento degli stampi nel caso di analisi della forgiatura.

A questo punto è stato realizzato il set-up del sistema nelle configurazioni esaminate e sono stati realizzati i test per la determinazione delle prestazioni negli ambiti di utilizzo. Particolare attenzione è stata fatta alla definizione dell'accuratezza e dell'incertezza del sistema di misura.

Infine state poi condotte delle campagne di prova su dei provini realizzati ad hoc per verificare che i risultati ottenuti fossero compatibili con i risultati attesi.

CAPITOLO 2

Stato dell'arte

2.1 Progettazione di sistemi di visione per applicazioni industriali

Un sistema di visione artificiale è costituito dall'integrazione di componenti ottiche, elettroniche e meccaniche che permettono di acquisire, registrare ed elaborare immagini sia nello spettro della luce visibile che al di fuori di essa (infrarosso, ultravioletto, raggi X, etc.).

Il risultato dell'elaborazione è il riconoscimento di determinate caratteristiche (feature) dell'immagine per varie finalità di ispezione visiva, misurazione, controllo di processo, identificazione e classificazione di parti o dettagli, robotica e controllo.

Un sistema di visione è costituito da diverse componenti:

- Telecamere e ottiche.
- Sistema di illuminazione.
- Oggetto da esaminare.
- Sistema di acquisizione e di elaborazione dell'immagine.
- Interfacce uomo-macchina.
- Interfacce con l'ambiente esterno.

Le parti da ispezionare vengono posizionate, spesso attraverso sistemi di movimentazione automatica, di fronte a una o più telecamere ed illuminati in modo appropriato, in modo cioè da evidenziare il più possibile le caratteristiche oggetto dell'analisi. Il sistema ottico forma un'immagine

sul sensore della telecamera che produce un segnale elettrico in uscita. Questo segnale verrà digitalizzato e memorizzato da una apposita scheda di acquisizione dati chiamata "frame grabber".

L'immagine catturata, e resa in questo modo "comprensibile" da un calcolatore, deve contenere le informazioni richieste per assolvere alla funzione a cui è destinato il sistema di visione. Questa verrà quindi elaborata con un apposito software, che comprende particolari algoritmi di calcolo e di analisi, per filtrare il rumore di sottofondo, correggere gli effetti degli errori di distorsione o eventuali riflessi, in modo che poi sia in grado di individuare le caratteristiche dell'immagine (feature) ed amplificarne alcuni aspetti, come ad esempio i bordi o il contorno, allo scopo di eseguire i controlli, le verifiche e le misurazioni per i quali il sistema è stato concepito.

Sulla base dei risultati dell'elaborazione il sistema prenderà decisioni in merito alla destinazione dell'oggetto, ad esempio smistarli fra i "buoni" o scartarli, e fornirà le informazioni opportune al resto del sistema produttivo per il controllo delle retroazioni [1].

Il sistema di visione può essere realizzato con architetture hardware e software anche molto diverse fra loro in funzione delle singole esigenze applicative, della necessità di disporre di potenze di calcolo più o meno grandi e di altre caratteristiche richieste al sistema.

Per quanto riguarda la telecamera, questo è il dispositivo optoelettronico che comprende ottica, sensore ed elettronica ed ha il compito di tradurre l'immagine dell'oggetto in un segnale video con certe caratteristiche.

Le varie tipologie di telecamera disponibili oggi sul mercato si distinguono per:

- Forma del sensore: lineare o matriciale.
- Risoluzione.
- Sensibilità del sensore: colore, bianco e nero, infrarosso, ultravioletto, raggi X.
- Tipo di segnale in uscita: analogico o digitale.
- Frequenza di acquisizione.

Ciascuna di queste caratteristiche risponde ad esigenze applicative ben precise.

Il numero e la dimensione fisica dei pixel determina la risoluzione effettiva della telecamera, cioè la dimensione del più piccolo particolare distinguibile. Per avere un'elevata risoluzione sono necessari dunque molti pixel, ma ridurre la dimensione dei pixel ne riduce anche la capacità di raccogliere la luce e quindi la sensibilità. Risoluzione e sensibilità sono caratteristiche correlate ed in opposizione fra loro, il compromesso migliore dipenderà dalle condizioni applicative.

Le telecamere dispongono di una serie di regolazioni per ottenere immagini adatte allo scopo che ci si prefigge anche in caso di variazioni delle condizioni di operative.

Le regolazioni più comuni sono il tempo di esposizione, la regolazione della messa a fuoco, e il controllo automatico del guadagno che permette di ottenere immagini con una distribuzione ottimale dei livelli di luminosità. Un altro importante controllo è il segnale di sincronismo, che viene utilizzato per comandare l'acquisizione dell'immagine in un istante preciso, utile nel caso di ripresa di un oggetto in movimento.

L'ottica del sistema ha invece la funzione di focalizzare l'immagine dell'oggetto da esaminare sul sensore della telecamera. Le caratteristiche della lente influiscono profondamente sull'immagine che verrà acquisita dalla telecamera. Alcune caratteristiche fondamentali delle lenti sono: la lunghezza focale, da cui dipendono parametri quali le dimensioni dell'immagine e la distanza tra telecamera e oggetto da esaminare; il rapporto focale o apertura, dalle cui dimensioni dipendono la luminosità e la risoluzione dell'immagine ottenuta; e la profondità di campo.

Una costituente essenziale e spesso critica del sistema di visione è l'illuminazione, infatti questa determina il modo con cui l'immagine verrà acquisita e successivamente elaborata.

Se l'illuminazione non è adeguata al tipo di analisi che si intende fare, le successive operazioni di acquisizione ed elaborazione sono destinate a fallire.

Le principali tecniche di illuminazione sono:

- Illuminazione direzionale.
- Illuminazione diffusa.
- Illuminazione coassiale o omnidirezionale.
- Illuminazione diascopea.
- Illuminazione strutturata.

Queste modalità sono indipendenti dalle proprietà fisiche della luce impiegata come ad esempio monocromaticità, colore, polarizzazione, eccetera.

Un altro aspetto fondamentale nella progettazione di un sistema di visione riguarda la sua integrazione con il processo produttivo. Tra gli aspetti che devono essere progettati ad hoc per ogni sistema i principali sono: il controllo delle fasi di movimentazione automatica per il posizionamento delle parti da esaminare nel campo visivo delle telecamere, la sincronizzazione temporale tra il processo ed il sistema di visione, i comandi alle fasi successive del processo sulla base dei controlli effettuati (ad esempio al sistema di smistamento per l'accettazione o lo scarto posto a valle del sistema di visione), la gestione degli allarmi e delle correzioni da effettuare nel caso in cui il sistema di monitoraggio rilevi uno scostamento del processo dai parametri normali di funzionamento e la trasmissione dei dati relativi al controllo o l'elaborazione e la trasmissione periodica dei dati statistici.

I sistemi di visione devono avere, inoltre, una interfaccia semplice, chiara ed intuitiva per l'operatore per garantire che questo possa utilizzarli in maniera totalmente trasparente.

Questa tecnologia è oggi sufficientemente evoluta per giocare un ruolo importante nei processi produttivi della maggior parte dei settori industriali, per il conseguimento di obiettivi di miglioramento della qualità dei prodotti e di riduzione dei costi.

I principali vantaggi offerti dai sistemi di visione sono:

- Costanza, affidabilità, oggettività dei controlli: consentono di eseguire un controllo su tutti i pezzi e mantengono nel tempo la costanza dei criteri di valutazione senza alcuna variazione delle prestazioni anche al variare, entro un certo range, delle condizioni operative, come ad esempio l'illuminazione. Garantiscono inoltre una omogeneità nel giudizio. Tutti questi aspetti sarebbero irraggiungibili da operatori umani.
- Operabilità in ambienti ostili: operano in condizioni ambientali limite come ambienti molto rumorosi, esposti ad agenti chimici, temperature molto elevate o molto fredde, aree nel raggio di azione di macchine o sistemi di movimentazione, spazi ristretti.
- Elevate velocità di controllo: sono in grado di svolgere operazioni di verifica in frazioni di secondo anche su oggetti in movimento molto veloce. La velocità di controllo genera due importanti opportunità fra loro correlate:
 - Possibilità di ripensare il sistema di controllo qualità passando da verifiche a campione a controlli totali (100% dei prodotti) con tutti i vantaggi che ne conseguono;
 - Possibilità di ridisegnare i processi e le linee di produzione, introducendo sistemi di movimentazione automatici ed evitando i polmoni intermedi dedicati precedentemente ai controlli qualità e al trasferimento dei pezzi da una fase all'altra.
- Controllo su oggetti di piccole dimensioni o non accessibili per altri strumenti: consentono di analizzare particolari non visibili o difficilmente identificabili dall'uomo grazie a ottiche e software specifici. Inoltre, consentono il controllo su parti non accessibili agli strumenti di misura a contatto.
- Elevata precisione del controllo: consentono, anche in presenza di oggetti caratterizzati da tolleranze molto ristrette, di raggiungere una precisione ed un'accuratezza del controllo di gran lunga superiore a quella di molti strumenti di misura a contatto.
- Generazione di dati sul processo: oltre ad assolvere ai compiti di controllo, sono in grado di generare e memorizzare dati sul processo in tempo reale, evidenziando scostamenti dai parametri ottimali. Questo consente di individuare eventuali segnali o trend di peggioramento

del processo (derive), fornendo così i dati necessari per intraprendere azioni correttive in modo reattivo e dinamico.

Le limitazioni tecnico-applicative dei sistemi di visione artificiale sono ancora numerose, soprattutto se esso non viene concepito, progettato ed installato sulla base di specifiche ben definite e stabilite in relazione all'ambito applicativo a cui è destinato.

Sono richieste dunque particolari attenzioni quando ci si trova ad operare con grandi varietà di pezzi da riconoscere e quando le valutazioni devono essere fatte sulla base di parametri non facilmente codificabili. Per quanto riguarda i fattori ambientali, quando si è in presenza di variazioni delle condizioni luminose, ambienti sporchi, polverosi, con presenza di fumi, tali cioè da compromettere l'integrità del percorso ottico; e nel caso di variazione delle condizioni in cui si presenta il prodotto oggetto dell'analisi [2][3].

2.2 Il ritorno elastico nella piegatura della lamiera

La piegatura rappresenta uno dei più comuni e più diffusi metodi di lavorazione delle lamiere. Questa è un'operazione per deformazione plastica che consiste nella modifica della forma di una lamiera mediante un'azione di flessione che produce, generalmente, deformazioni permanenti in zone relativamente limitate della lamiera stessa.

Questo processo permette di realizzare sia forme molto semplici sia geometrie estremamente complesse. La piegatura è applicabile a tutti i materiali sufficientemente plastici da non determinare rotture in corrispondenza della piega.

Questa operazione viene nella maggior parte dei casi eseguita a temperatura ambiente, tuttavia, quando l'oggetto da deformare presenta ridotti raggi di raccordo o elevate sezioni, può essere necessario eseguire il processo a caldo, consentendo una maggiore deformabilità del materiale, nonché una riduzione delle forze in gioco.

Il processo di piegatura può essere applicato, oltre che alle lamiere, ad altri semilavorati, come tubi, fili, nastri e barre di diverse sezioni.

Nonostante la sua semplicità, il processo di piegatura è interessato da varie problematiche che lo rendono tutt'oggi oggetto di studio. I principali tra questi problemi sono legati al ritorno elastico, ai limiti di formabilità del materiale e all'influenza delle lavorazioni per deformazione plastica precedenti alla piegatura.

Il fenomeno del ritorno elastico, o springback, si manifesta nei componenti sottoposti a flessione in campo elastoplastico e consiste nel parziale ritorno alla forma originale dopo la rimozione delle forze

e dei momenti di piegatura. In particolare, all'atto di annullare i momenti applicati sulla lamiera si assiste alla scomparsa di una parte della deformazione impressa.

Questo fenomeno, se non opportunamente compensato, conduce alla realizzazione di un pezzo caratterizzato da un angolo effettivo di piega diverso da quello desiderato. Come si può vedere in *Figura 2.1*, dopo il ritorno elastico, l'angolo finale ed il raggio di piega sono maggiori di quelli a cui il pezzo era stato condotto sotto carico.

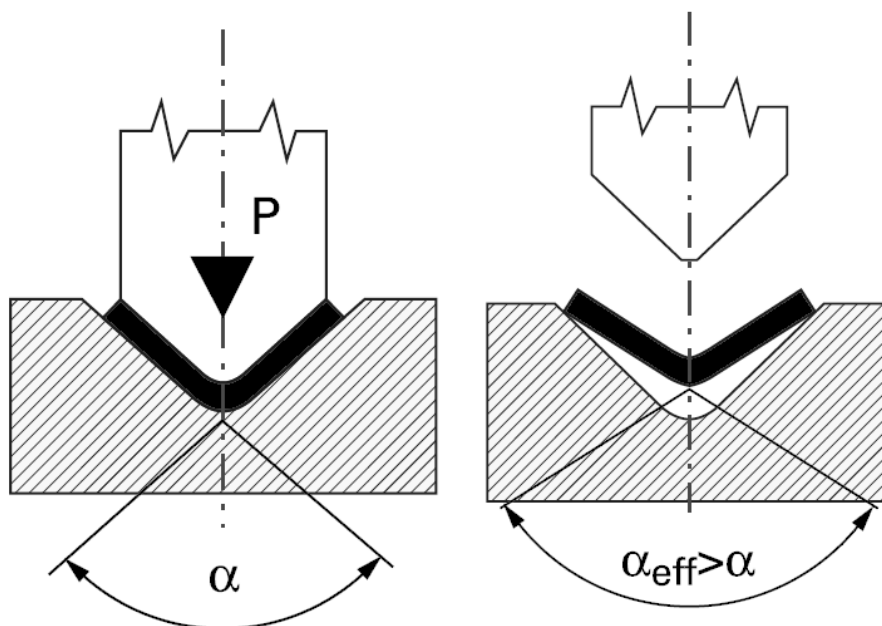


Figura 2.1 Recupero elastico nella lamiera.

L'entità del ritorno elastico dipende da numerosi parametri legati sia al materiale che al processo; i principali sono: il modulo di elasticità del materiale, il carico di snervamento, il tasso di incrudimento, lo spessore della lamiera, il raggio di piegatura, il raggio del punzone e la tipologia di sollecitazione impressa. In generale, è possibile asserire che il valore del ritorno elastico cresce all'aumentare della tensione di snervamento, dell'indice di incrudimento e del raggio di piega, mentre decresce all'aumentare del modulo di elasticità e dello spessore della lamiera. Nel caso di una lamiera soggetta a deformazioni nel campo elastoplastico, le fibre vengono deformate in modo differente a seconda della loro posizione all'interno della lamiera. Le fibre che si sono plasticizzate durante la fase di carico restituiscono la loro componente elastica durante la fase di scarico, tendendo a tornare nella posizione originale. Questo tuttavia non si manifesta in modo totale a causa della diversa sollecitazione a cui sono state sottoposte le varie fibre. In particolare, quelle adiacenti all'asse neutro tendono a trovarsi, nella fase di carico, ancora in regime elastico e, al momento dello scarico, il loro totale recupero della forma originale è inibito dalla presenza delle fibre più esterne che hanno subito

deformazioni di tipo irreversibile. L'entità del ritorno elastico deriva dunque dalla differenza tra le tensioni o le deformazioni nei due casi.

Come grandezza che caratterizza il ritorno elastico è possibile utilizzare il fattore di ritorno elastico K , definito, oltre che come rapporto tra l'angolo di piega una volta rimosso il carico e l'angolo di piega sotto carico, come segue:

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} = \frac{(2R_i/t) + 1}{(2R_f/t) + 1}$$

dove α_i ed α_f sono rispettivamente gli angoli di piega iniziali e finali, R_i ed R_f i raggi di piega iniziali e finali e t è lo spessore della lamiera, come mostrato in *Figura 2.2*.

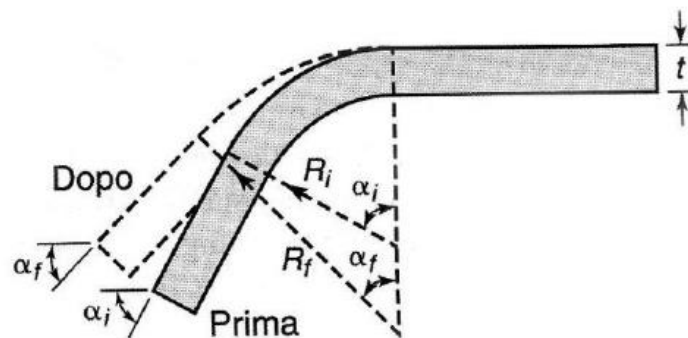


Figura 2.2 Terminologia per il ritorno elastico.

A causa della non uniformità del materiale delle lamiere, la determinazione dei valori caratteristici del fattore elastico K al variare dei vari parametri che lo influenzano risulta molto difficile. Per far fronte a questa incertezza si usano spesso soluzioni empiriche che consentono di ottenere una piega con un angolo il più prossimo possibile a quello voluto. Assumono quindi sempre maggior importanza i sistemi che consentono la rilevazione e la correzione automatica degli errori conseguenti al ritorno elastico durante il processo di piegatura.

Una volta quantificata l'entità del ritorno elastico, esistono varie tecniche per compensarlo con lo scopo di ridurne o eliminarne gli effetti. Tra le tecniche principali si cita la sovrapiiegatura. Questa prevede la piegatura della lamiera con un angolo superiore a quello desiderato, il cui valore risulta dalla somma dell'angolo richiesto più il valore angolare corrispondente al recupero elastico. Affinché questo metodo dia risultati soddisfacenti è necessario conoscere con accuratezza l'entità del ritorno elastico, è opportuno quindi che questa venga misurata ogni volta che si esegue l'operazione piuttosto che calcolata a priori per tutto il lotto di produzione tramite regole empiriche.

Altre tecniche di compensazione del ritorno elastico sono: la coniatura, che si basa sulla compressione della zona di piega della lamiera tra stampo e matrice; la stiropiegatura, in cui il pezzo è sottoposto a trazione mentre viene piegato allo scopo di ridurre il momento di piegatura; e la piega in temperatura, processo che si basa sull'esecuzione della piega ad elevate temperature [4].

Alcuni esempi dei metodi di compensazione sono illustrati in *Figura 2.3*.

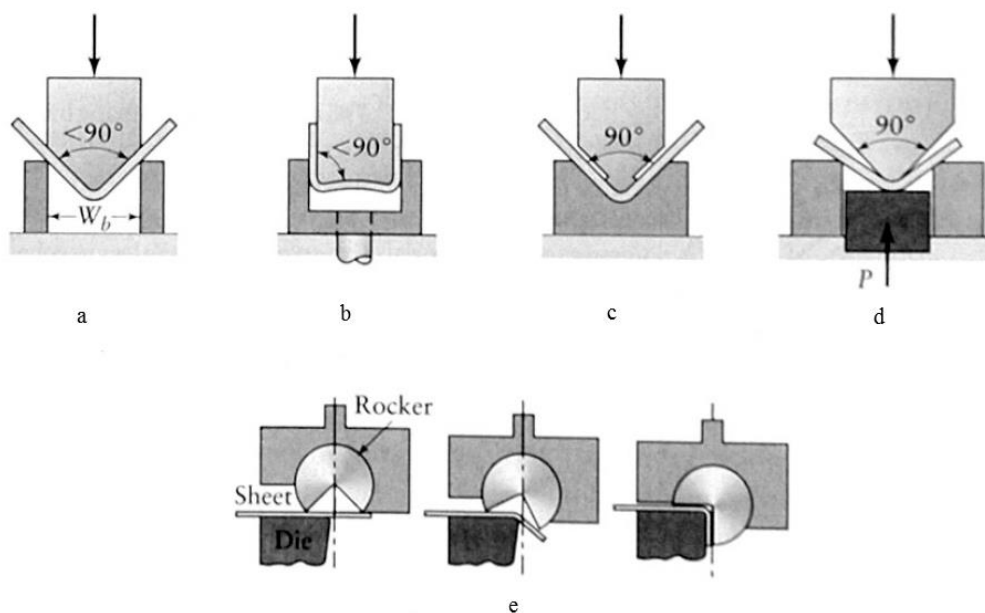


Figura 2.3 Metodi di compensazione o eliminazione del ritorno elastico nelle operazioni di piegatura. a), b), e) Sovrapiiegatura. c), d) Coniatura

2.2.1 Profili a singola curvatura; profili a doppia curvatura

La piegatura della lamiera nella pratica viene realizzata secondo più varianti del processo di base. Esistono, infatti, innumerevoli processi di piegatura utilizzati industrialmente sia per la realizzazione di piccoli lotti che per impieghi di grande serie. Alcuni di questi processi sono basati su una singola operazione ed eseguiti in singole stazioni di lavoro; altri processi sono più complessi e si basano sulla combinazione di più operazioni elementari che vengono realizzate contemporaneamente o in modo progressivo.

Innanzitutto è possibile fare una prima distinzione tra operazioni di piegatura singole e operazioni di piegatura composte. Le prime utilizzano matrici o punzoni che realizzano profili a singola curvatura, vedi *Figura 2.1*, cioè che eseguono una sola piegatura alla volta sulla singola stazione di lavoro. Quando questa viene completata, gli utensili vengono sostituiti con quelli necessari per l'operazione successiva. Questa tipologia di piegatura viene utilizzata per produzioni limitate, o comunque nei casi in cui alta flessibilità e bassi tempi di attrezzaggio sono preferibili ad alti tassi di produzione. Viene

impiegata anche per la realizzazione di pezzi dalla geometria particolarmente complessa, dove per esempio, l'esecuzione di una sola piegatura alla volta risulta vantaggiosa economicamente.

Nella piegatura composta, invece, vengono combinate due o più operazioni di piega in una singola stazione di lavoro senza necessità di riposizionare il pezzo in lavorazione. Questo permette di ottenere profili a doppia curvatura, mostrati in *Figura 2.4*, o a curvatura multipla rispettivamente, con un solo colpo della pressa utilizzando un'unica matrice. In questo caso la velocità della pressa è di poco inferiore al caso di piegature singole, pertanto, il tempo di produzione e i costi di lavorazione diminuiscono in proporzione al numero di pieghe svolte durante una singola discesa del punzone.

Un'altra tipologia di piegatura prevede l'utilizzo di stampi progressivi. Questi combinano in un unico settaggio diverse operazioni effettuate con un solo colpo di pressa. La differenza con il caso della piegatura composta sta nel fatto che le operazioni non sono svolte in un'unica stazione di lavoro, ma sono distribuite su un certo numero di stazioni tra le quali avanza una striscia di lamiera, che corrisponde a numerosi pezzi uniti insieme, quindi le operazioni svolte durante il colpo della pressa è come se fossero eseguite su pezzi diversi.

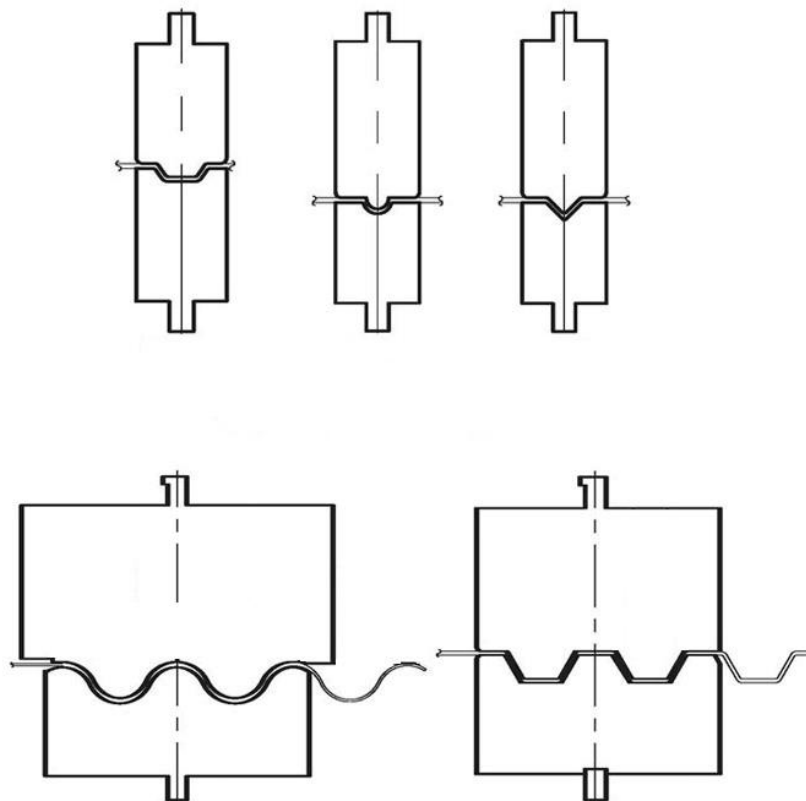


Figura 2.4 Esempi di operazioni di piegatura per l'ottenimento di profili a doppia curvatura.

Di seguito viene brevemente presentata la configurazione di piega a V, o V-bending, che è una tra le più diffuse operazioni di piegatura che è possibile eseguire su una lamiera. Questa tipologia di piega

è quella che è stata presa in considerazione per lo sviluppo del sistema di visione per la misura dell'angolo di piega. La piegatura a V si suddivide in piegatura libera o in stampo e consente di ottenere un profilo a semplice curvatura. Si parla di piegatura libera, detta anche piegatura su tre punti, quando la lamiera viene semplicemente disposta su due appoggi e deformata da una punzone, mostrata in *Figura 2.5-a*. È importante notare come il raggio di piega sia sempre superiore al raggio di testa del punzone. Questa caratteristica conferisce a questa configurazione di piega un'ottima flessibilità e non richiede attrezzature particolarmente complesse o costruite appositamente per una specifica operazione, consentendo di realizzare una vasta gamma di pieghe con un singolo utensile. In questo tipo di processo la funzione dell'utensile è solo quella di trasmettere il momento flettente al pezzo in lavorazione e l'angolo finale di piega è ottenuto attraverso il controllo della profondità di penetrazione del punzone all'interno della matrice. Questo permette di compensare il ritorno elastico attraverso la sovrapiiegatura della lamiera.

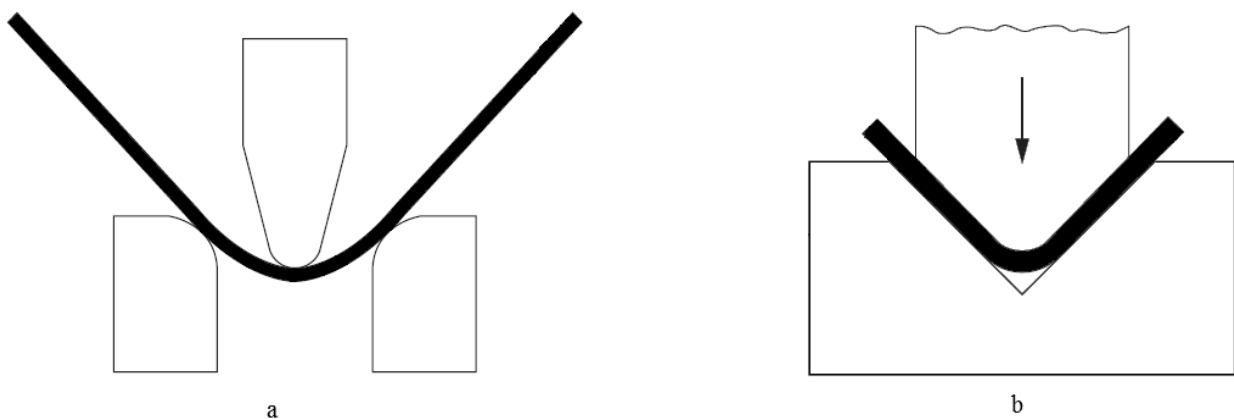


Figura 2.5 V-bending. a) Piegatura libera. b) piegatura in stampo.

La piegatura a V in stampo utilizza invece come utensili una matrice e un punzone sagomati in modo da conferire alla lamiera una forma ben precisa, vedi *Figura 2.5-b*. In questo caso il ritorno elastico viene compensato con una fase di coniatura nella matrice. Questo tipo di processo richiede l'utilizzo di macchine piegatrici con limiti di forza più elevati rispetto al caso di piegatura libera.

2.2.2 Metodi di controllo del ritorno elastico

Considerata l'importanza del ritorno elastico, tutti i costruttori di presse piegatrici dedicano una particolare attenzione al problema. Sono stati quindi sviluppati numerosi dispositivi atti alla rilevazione ed alla compensazione automatica degli errori che ne conseguono. L'obiettivo principale che si cerca di conseguire è che tali sistemi siano integrati alla macchina piegatrice stessa.

Tra le soluzioni studiate e diffuse la maggior parte si basano sul controllo degli spostamenti degli elementi della pressa ed in particolare sul controllo della corsa del punzone. Queste assumono significato principalmente nel caso di piegatura libera di profili a singola curvatura, infatti, questo è un processo molto flessibile e permette di ottenere, semplicemente variando la corsa del punzone, diversi angoli di piega con lo stesso utensile. In questi casi il ritorno elastico successivo allo scarico non è assolutamente trascurabile e viene in genere annullato mediante sovrapiiegatura. Per quanto riguarda la realizzazione di profili a doppia curvatura i metodi sono molto meno affermati e la gran parte ancora in fase di sviluppo.

Per prime vengono presentate le tecniche di controllo più diffuse applicate al caso di realizzazione di profili a singola curvatura.

Alcuni produttori di presse offrono dei dispositivi capaci di garantire un'accuratezza dell'angolo di piega entro i $\pm 20'$. Le soluzioni adottate da questi dispositivi si basano sull'acquisizione di dati durante il processo.

Una prima soluzione, detta *adaptive forming*, è connessa alla misura diretta dell'angolo di piega attraverso un sistema ottico basato sulla interferometria laser. Il valore numerico dell'angolo viene usato direttamente come feedback di controllo del punzone. Il principale vantaggio di questa soluzione è legato alla sua semplicità e robustezza. Le limitazioni sono invece legate all'impossibilità di eseguire le misure quando la superficie del lembo di lamiera piegato supera una certa soglia di inclinazione rispetto al raggio incidente e nel caso di lamiere rivestite, o quando la flessione è confinata al bordo della lamiera. Inoltre, sono necessarie lunghe soste a fine corsa per eseguire la misurazione, prolungando quindi i tempi di produzione.

Per non influire troppo sui tempi del processo questa soluzione prevede il controllo del punzone mediante regole empiriche e si suddivide in due parti: una prima valutazione del ritorno elastico attraverso un ciclo di "addestramento" (lento), e in successivi cicli standard di flessione (veloci) [5].

Un'altra soluzione adottata, sempre basata sulla misura diretta dell'angolo di piega, consiste nell'integrazione di due tastatori nella matrice di piegatura, vedi

Figura 2.6. L'angolo effettivo di piega viene calcolato tramite la misura della distanza tra due punti sfasati della lamiera.

I vantaggi offerti da questa soluzione sono l'accuratezza, la compattezza e la robustezza dello strumento, la semplicità di realizzazione, di installazione e montaggio. Le limitazioni sono invece legate alla possibilità di ingresso di polveri nello strumento e all'impuntamento dei tastatori, oltre al fatto che per ogni configurazione di piega è necessario l'apposito strumento [6].

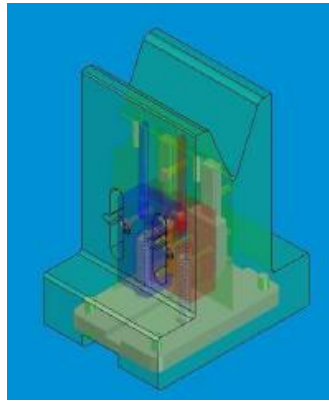


Figura 2.6 Matrice utilizzata per la misura dell'angolo di piega mediante tastatori.

Un'ulteriore soluzione si basa sullo studio del carico totale come funzione dello spostamento del punzone al fine di raccogliere informazioni riguardo la legge sforzo-deformazione del materiale. Questa analisi è complicata dalla distribuzione non uniforme della relazione sforzo-deformazione ricavabile dalle operazioni di flessione, quindi richiede un modello teorico del processo caratterizzato da una certa complessità (teoria delle grandi deformazioni e fenomeni di incrudimento). Nonostante ciò, questa soluzione consente sia la progettazione efficiente della pressa (tutti i dispositivi di misura sono collocati al suo interno) sia la descrizione in modo completo delle proprietà della lamiera, permettendo uno studio teoricamente esaustivo. L'accuratezza del dispositivo è legata essenzialmente alla qualità dei dati in input, la quale decresce con l'aumento della velocità del punzone [5].

Oltre a questi metodi inline, vengono comunemente adottati metodi analitici ed empirici per valutare il ritorno elastico e quindi calcolare lo spostamento del punzone da applicare in funzione dell'angolo di piega desiderato.

Per quanto riguarda gli algoritmi empirici, bisogna sottolineare che sono estremamente veloci, ma non così accurati e necessitano come input dati non sempre facili da raccogliere, come lo spessore effettivo del materiale nei vari tratti di piega e le caratteristiche del materiale.

Sono state utilizzate anche tecniche basate sull'utilizzo di reti neurali, questo approccio è utile per ottenere una maggiore accuratezza, ammesso che vi siano dati in idonea quantità.

Le tecniche di simulazione basate sul Metodo degli Elementi Finiti (FEM) si dimostrano efficaci per la loro flessibilità, robustezza e capacità predittiva. La procedura FEM è comunque una procedura

complessa che richiede la descrizione accurata di numerosi parametri di input, come le leggi sforzo-deformazione del materiale, lo spessore reale della lamiera, eccetera. Tutti questi aspetti porterebbero ad avere tempi di calcolo troppo lunghi per la dinamicità e flessibilità richieste al sistema produttivo oggetto dell'analisi. Questo limite può essere superato utilizzando un approccio ibrido, ovvero combinando procedure empiriche, analisi FEM e raccolta di dati relativi al materiale durante l'esecuzione della procedura stessa.

Le tecniche più accurate che vengono utilizzate nella piegatura di profili a doppia curvatura sono tecniche di misura offline che si basano sulla ricostruzione del profilo della lamiera dopo la piegatura tramite macchine di misura a coordinate (CMM). I metodi più usati sono quelli che si basano sugli algoritmi empirici e sulle tecniche FEM [7], ma queste mantengono le limitazioni esposte sopra aggiunte al fatto della presenza di una configurazione geometrica più complessa. Per quanto riguarda i metodi basati su misure dirette non si riscontrano tecniche particolarmente affermate e degne di nota.

Obiettivo di questa tesi è quello di proporre dei metodi per l'acquisizione diretta di dati tramite l'elaborazione delle immagini ricavate durante il processo da un sistema di visione sia per il caso di piegatura di profili a singola curvatura sia per quello di profili a doppia curvatura.

Per i primi, nelle configurazioni più semplici come ad esempio nel V-bending, si andranno ad individuare i lembi di lamiera ai due lati della piega e, dopo averli caratterizzati tramite feature rettilinee, si andrà a misurare l'angolo tra le due rette in real-time.

Nel caso di configurazioni più complesse, come ad esempio nella nervatura, o nel caso di piegatura di profili a doppia curvatura, si andrà a valutare il ritorno elastico tramite la rilevazione dell'evoluzione del contorno della lamiera durante il processo.

2.3 Misura dell'elasticità di macchine per deformazione

Oggi il mercato richiede ai produttori il rispetto di tolleranze sempre più strette dei componenti ottenuti mediante forgiatura. Per motivi di economicità queste devono al contempo salvaguardare la vita in servizio delle attrezzature ed ottenere prodotti near net-shape o net-shape in modo da ridurre i costi del materiale.

Nel processo di forgiatura qualsiasi deviazione dalle condizioni di simmetria nell'esecuzione del processo stesso dà origine a dei carichi eccentrici sulla pressa. Per esempio questi hanno luogo durante la forgiatura di componenti non simmetrici o nei processi multi-step, vedi *Figura 2.7*. Questo porta ad avere delle distorsioni della pressa ed un posizionamento non parallelo e degli spostamenti

tra la tavola superiore e quella inferiore della pressa che a loro volta danno luogo ad una riduzione dell'accuratezza e al possibile superamento delle tolleranze richieste dalle specifiche, vedi *Figura 2.8*.

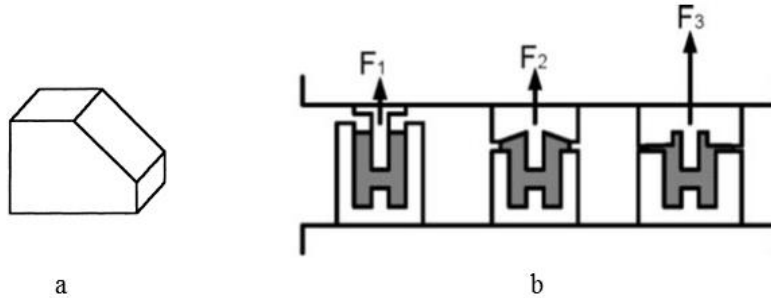


Figura 2.7 Esempi di cause carichi eccentrici. a) Componente non simmetrico. b) Processo multi-step.

Le distorsioni della pressa sono il risultato della variazione delle forze di reazione combinate con la rigidità del sistema pressa-stampo-pezzo durante il processo, dovute al cambiamento di geometria del pezzo.

Dalla conoscenza della forze di reazione del pezzo, misurate ad esempio con le tecniche proposte in letteratura, e dalla conoscenza della rigidità del sistema pressa-stampo-pezzo e dei giochi della pressa, è possibile prevedere quali saranno le deflessioni della macchina ed eseguire le conseguenti compensazioni. Inoltre, nota la rigidità della macchina, è possibile ottimizzare il processo tramite il posizionamento del pezzo da lavorare, facendo coincidere la direzione per la quale sono richieste tolleranze più strette con la direzione in cui si ha la rigidità più elevata della pressa.

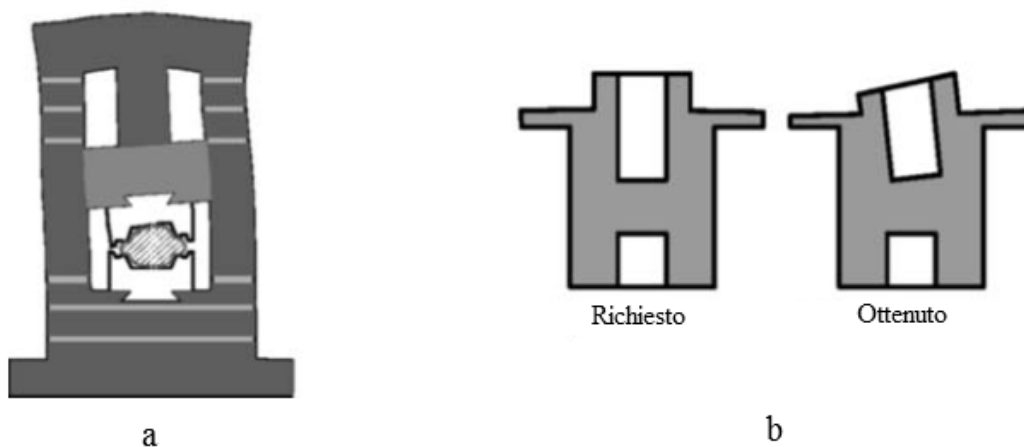


Figura 2.8 Distorsioni sulla pressa e relativo effetto sul componente. a) Esempio di distorsioni della pressa. b) Confronto tra il pezzo richiesto dalle specifiche e quello realmente ottenuto a causa delle distorsioni della pressa, il componente si riferisce al processo multi-step di *Figura 2.7*.

La definizione della rigidità della macchina è data come il rapporto tra il carico e la conseguente distorsione in relazione al sistema di coordinate mostrato in *Figura 2.9*. Il comportamento della pressa viene quindi descritto attraverso sei valori di rigidità, tre dei quali legati agli spostamenti lungo i tre assi (X, Y, Z) e tre alle rotazioni attorno agli assi (A, B, C).

Chodnikiewicz [8] ha introdotto una espressione che prevede l'utilizzo della matrice di flessibilità, composta da 36 elementi, per descrivere i vettori di azione e reazione. Il vettore di azione esprime le forze nelle direzioni X, Y e Z e i momenti attorno gli assi, mentre il vettore di reazione contiene gli spostamenti lineari e le rotazioni nello stesso sistema di coordinate. Gli elementi della matrice di flessibilità sono riferiti alle deformazioni causate da carichi unitari. Per ogni elemento il primo indice rappresenta la direzione della deflessione ed il secondo la direzione di applicazione del carico. Per tenere conto anche dell'influenza dei giochi presenti tra gli elementi della pressa viene introdotto nell'espressione il vettore dei giochi (ω_i).

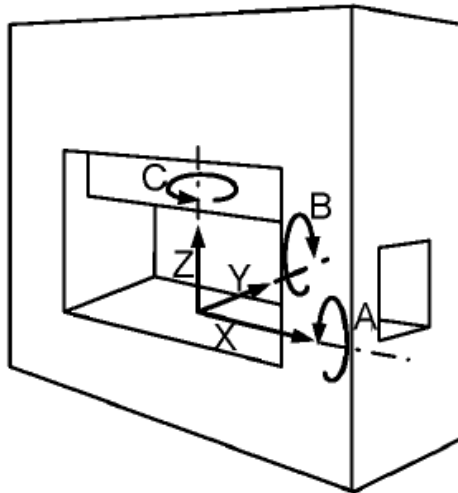


Figura 2.9 Definizione del sistema di coordinate.

L'espressione è la seguente:

$$[Reaction] = [Flexibility Matrix] \times [Action] + [Clearance]$$

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta A \\ \Delta B \\ \Delta C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{XX} & \lambda_{XY} & \lambda_{XZ} & \lambda_{XA} & \lambda_{XB} & \lambda_{XC} \\ \lambda_{YX} & \lambda_{YY} & \lambda_{YZ} & \lambda_{YA} & \lambda_{YB} & \lambda_{YC} \\ \lambda_{ZX} & \lambda_{ZY} & \lambda_{ZZ} & \lambda_{ZA} & \lambda_{ZB} & \lambda_{ZC} \\ \lambda_{AX} & \lambda_{AY} & \lambda_{AZ} & \lambda_{AA} & \lambda_{AB} & \lambda_{AC} \\ \lambda_{BX} & \lambda_{BY} & \lambda_{BZ} & \lambda_{BA} & \lambda_{BB} & \lambda_{BC} \\ \lambda_{CX} & \lambda_{CY} & \lambda_{CZ} & \lambda_{CA} & \lambda_{CB} & \lambda_{CC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ M_A \\ M_B \\ M_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_C \\ \omega_A \\ \omega_B \\ \omega_C \end{bmatrix}$$

dove gli spostamenti lineari sono espressi in [mm], le rotazioni in [mm/m], le forze in [kN] e i momenti in [kNm].

La matrice di flessibilità, in linea di principio, viene determinata applicando un carico noto e misurabile alla pressa e rilevando le corrispondenti deviazioni nelle varie direzioni. L'attrezzatura necessaria quindi si suddivide in un sistema di applicazione e controllo del carico ed un sistema di misurazione delle distorsioni della macchina. Per la determinazione dei 36 elementi della matrice è dunque necessario mettere appunto un sistema per l'applicazione orizzontale del carico. Questa equazione con sei gradi di libertà è stata formulata per rappresentare sia la parte lineare di rigidità della pressa e degli stampi, sia la parte non lineare dovuta ai giochi tra le guide e la mazza della macchina.

2.3.1 Metodi per la misura dello spostamento degli stampi

In questo paragrafo vengono presentati i sistemi di misurazione degli spostamenti finora utilizzati per le valutazioni della rigidità.

La prima tecnica si basa sull'utilizzo di trasduttori di spostamento induttivi. Le configurazioni possibili prevedono l'utilizzo di sei o otto trasduttori, un esempio di posizionamento è mostrato in *Figura 2.10*. Per evitare vibrazioni del sistema di misura ciascun induttore è fissato rigidamente alla tavola o alla mazza. Per escludere qualsiasi influenza legata al posizionamento degli strumenti invece, prima di eseguire le prove sotto carico viene effettuata una corsa "a vuoto" per rilevare i valori di riferimento. Le deviazioni dello stampo verranno poi determinate sottraendo questi valori di riferimento da quelli ottenuti sotto carico [9].

Questo metodo consente di avere a disposizione risultati accurati che vengono acquisiti ed elaborati in real-time e consente di ricostruire l'andamento degli spostamenti durante tutta la fase di deformazione del pezzo in lavorazione [10].

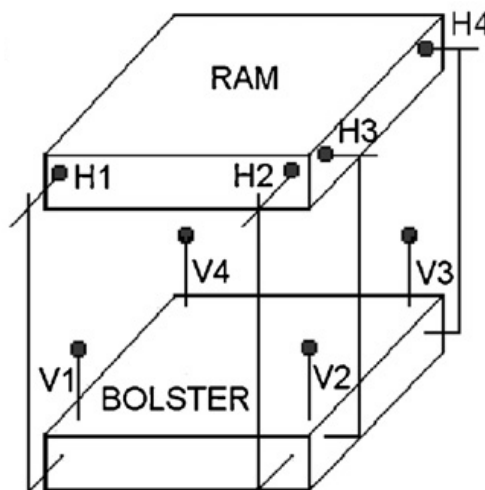


Figura 2.10 Disposizione dei trasduttori di spostamento induttivi nella configurazione a 8 dispositivi.

La misura degli spostamenti può anche essere eseguita posizionando dei trasduttori di spostamento lineari sulle colonne della pressa, per rilevare gli spostamenti della mazza, ed altri sulla base della tavola [11].

Un altro metodo per la misurazione degli spostamenti dello stampo prevede l'utilizzo di un set di provini in piombo, questi verranno posizionati in modo che durante la corsa della mazza e durante il colpo il carico si causino solo piccole deformazioni o deformazioni nulle, vedi *Figura 2.11*. Dal momento che il piombo è estremamente malleabile e le deformazioni che interessano i provini sono piccole i suoi effetti di reazione risultano trascurabili. La differenza tra l'altezza iniziale dei provini e quelle risultanti dopo il colpo consentono la misurazione degli spostamenti della pressa nelle varie posizioni [12].

Questo metodo risulta molto meno accurato del primo e necessita, per la valutazione degli spostamenti, di una analisi dei dati molto più lenta del caso precedente e non eseguibile in real-time.

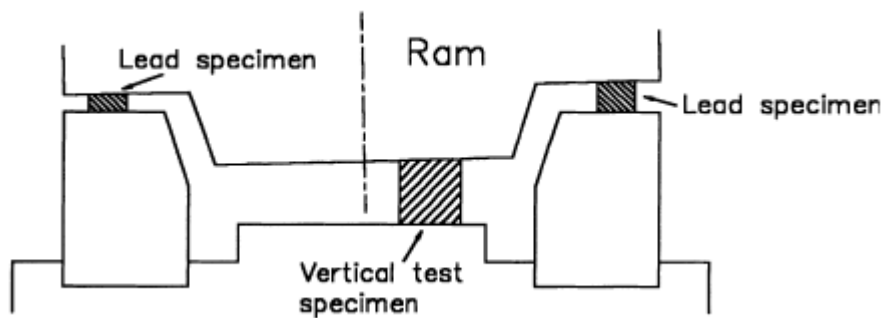


Figura 2.11 Determinazione degli spostamenti mediante provini in piombo.

Un altro approccio prevede la misura degli spostamenti mediante l'utilizzo di comparatori per rilevare gli spostamenti degli stampi. Questo metodo però ha una scarsa accuratezza per la forte influenza delle vibrazioni della pressa sui dati rilevati.

Un'ulteriore soluzione consiste nell'utilizzo di quattro calibri incrementali, montati tra la tavola della pressa e la mazza in corrispondenza dei quattro angoli; e due sensori di distanza optoelettronici, per la misura degli spostamenti orizzontali. Questo sistema, che prevede la presenza anche di un cilindro idraulico per l'applicazione controllata dei carichi, è chiamato LMD (Load and Measurement Device) [13].

Questo sistema è mostrato in *Figura 2.12*.

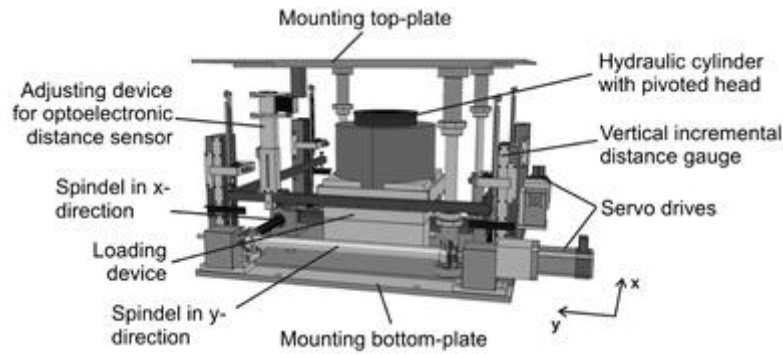


Figura 2.12 Automated load and measurement device (LMD).

È stata proposta anche una tecnica di monitoraggio dinamico in real-time misura gli spostamenti della pressa e degli stampi attraverso una configurazione di accelerometri disposti in una pluralità di posizioni della macchina, vedi Figura 2.13 [14]. I dati rilevati dagli accelerometri vengono convertiti da un'unità CPU in dati di spostamento. Attraverso opportuni filtri è possibile dividere gli spostamenti legati alla rigidità della macchina e dei giochi delle guide dagli spostamenti legati alle vibrazioni.

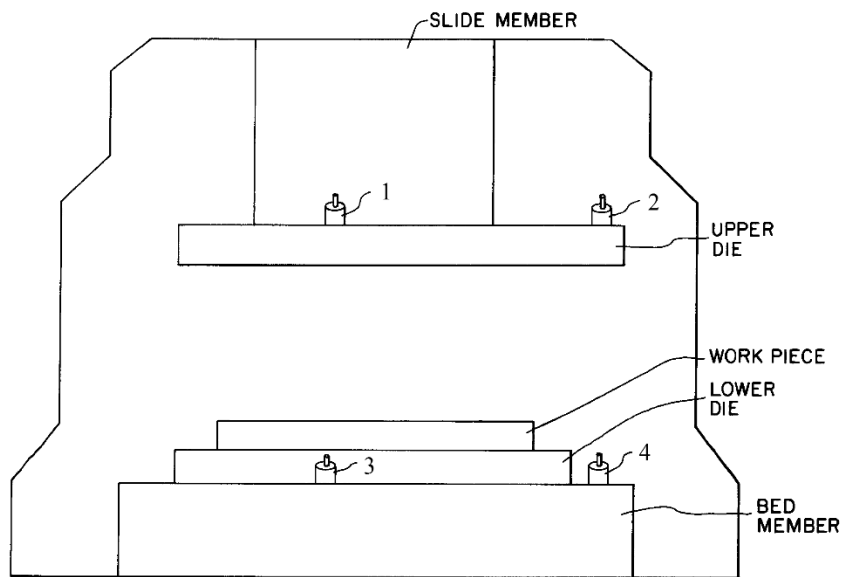


Figura 2.13 Misura degli spostamenti tramite accelerometri.

In questo lavoro viene proposto un metodo di rilevamento degli spostamenti degli stampi in real-time durante il processo di forgiatura attraverso un sistema di visione. Questa soluzione si basa sul rilevamento della posizione di due marker, affissi uno allo stampo inferiore e uno allo stampo superiore, nelle immagini acquisite dalla telecamera durante il processo di forgiatura a freddo.

CAPITOLO 3

Apparato sperimentale

3.1 Telecamera AVT Prosilica GT 1660: caratteristiche tecniche

Una parte fondamentale dei sistemi di visione è costituita dalla telecamera e dalle ottiche del sistema stesso. Per l'apparato che è stato messo a punto nel presente lavoro è stata utilizzata la telecamera AVT Prosilica GT 1660, mostrata in *Figura 3.1*.

L'azienda costruttrice, *Allied Vision Technologies* (AVT), fondata nel 1989 con sede principale a Stadtroda in Germania, rappresenta uno dei produttori leader a livello mondiale di macchine digitali per la visione artificiale. Le telecamere AVT si prestano ad una vasta gamma di applicazioni sia in campo industriale che nei campi medico-scientifici, logistici e di sorveglianza.

Il modello di telecamera usato, "Prosilica GT 1660", è un modello di telecamera digitale compatta progettata per l'acquisizione di immagini in condizioni ambientali estreme, con temperature variabili nel campo che va da -20°C a 65°C , e con condizioni di illuminazione altamente variabili. Questa è una telecamera in bianco e nero (B/N) con una risoluzione massima di 1.9 Megapixel, protocollo di trasferimento dati Gigabit Ethernet interface (GigE Vision) e protocollo di sincronizzazione con il clock centrale del sistema del dispositivo Host del tipo PTP IEEE 1588. Questo dispositivo rientra nella categoria delle telecamere veloci e con alta sensibilità e consente di regolare in modo preciso l'esposizione ed il guadagno.

L'ottica utilizzata per la telecamera è la lente a distanza focale variabile "Componon-S2.8/50" prodotta da *Schneider Kreuznach*. Questa consente inoltre un controllo preciso del diaframma

dell'obiettivo che permette all'utente, regolandone l'apertura, di ottimizzare la profondità del campo visivo senza ulteriori comandi [15].

Le principali caratteristiche tecniche della telecamera sono elencati in *Tabella 3.1*.



Figura 3.1 AVT Prosilica GT 1660.

Tabella 3.1 Caratteristiche tecniche AVT Prosilica GT 1660 [16].

Interface	IEEE 802.3 1000baseT
Resolution	1600x1200
Sensor	Kodak KAI-02050
Sensor type	CCD Progressive
Sensor size	Type 2/3
Cell size	5.5 μm
Lens mount	C-Mount
Max frame rate at full resolution	62 fps
A/D	14 bit
On-board FIFO	128 MB
Bit depth	8/14 bit
Mono Modes	Mono8, Mono12Packed, Mono16
Operating temperature	-20°C ÷ +65°C
Mass	224 g
Body Dimensions (L x W x H)	92 x 53.3 x 33 mm
Regulation	CE, FCC Class A, RoHS

3.2 Analisi delle prestazioni della telecamera: il frame rate

In entrambe le applicazioni studiate in questo lavoro, la caratteristica fondamentale del sistema di visione messo a punto è la frequenza di acquisizione della telecamera, il cosiddetto frame rate. Questo non è altro che il numero di fotogrammi che la telecamera riesce a catturare nell'unità di tempo di riferimento, cioè il secondo. Esso è espresso dunque in fotogrammi al secondo, *frame per second* [fps].

Nella piegatura della lamiera, per avere le caratteristiche di real-time, il sistema di misura dell'angolo deve avere una frequenza operativa maggiore o uguale a quella del processo in modo da fornire in modo reattivo i dati al sistema di feedback per la compensazione del ritorno elastico.

Nella determinazione degli spostamenti degli stampi durante la forgiatura, invece, data l'elevata velocità dei componenti in movimento e i ridotti tempi di deformazione del componente in lavorazione, è necessario un sistema di acquisizione dati in grado di operare ad elevata frequenza per ottenere un numero di dati significativo che consenta la ricostruzione degli spostamenti.

Per questi motivi è stata svolta una analisi preliminare dei vincoli sul frame rate della telecamera, sui metodi per incrementarlo e sui valori ottenibili con questi metodi.

Innanzitutto il primo vincolo è legato alla frequenza massima di trasferimento dei dati attraverso una porta del tipo Gigabit Ethernet, espresso in [Bytes/s]. Per calcolare il valore del flusso dei dati trasferiti si utilizza la seguente formula:

$$\text{StreamBytesPerSecond} = \text{Height} \times \text{Width} \times \text{FrameRate} \times \text{Bytes per Pixel}$$

Il cui valore massimo per una porta GigE è di 115000000 Bytes/s. Oltre questo valore si ha la perdita dei pacchetti di dati che vengono trasferiti [17].

Questo valore massimo deve essere impostato come valore di trasferimento dei dati in uscita dalla telecamera nell'apposito controllo in fase di settaggio degli attributi della telecamera (questo verrà esposto in maniera più approfondita nel paragrafo 4.4).

Per quanto riguarda la codifica delle immagini è stato scelto di operare in scala di grigi a 8 bit, per cui ogni pixel dell'immagine ha un peso di trasferimento pari ad un byte.

Il valore massimo del frame rate a piena risoluzione della telecamera è quindi di 62 fps.

Per ottenere gli scopi prefissati, a questo punto è stato dunque necessario agire sugli altri parametri che condizionano il valore del frame rate per farlo aumentare. Questi sono il tempo di esposizione, il formato dell'immagine.

Perché sia possibile aumentare il frame rate è necessario in primis diminuire il tempo di esposizione, cioè il tempo durante il quale il sensore della telecamera rimane esposto alla luce per ogni

fotogramma. Infatti, più lungo è il tempo di esposizione di ogni immagine e minore sarà il numero di immagini acquisite nell'unità di tempo.

Durante il tempo di esposizione però la telecamera implementa in automatico degli algoritmi di equalizzazione tramite i quali viene calibrato il contrasto nell'immagine catturata in modo da aumentarlo ed accentuare i dettagli presenti, vedi *Figura 3.2*. Minore è il tempo di esposizione e minore sarà il tempo a disposizione della telecamera per implementare questi algoritmi di equalizzazione non consentendo così l'ottimizzazione nella redistribuzione dei valori di intensità dei pixel.

L'abbassamento del tempo di esposizione porta quindi anche ad una generale riduzione della qualità dell'immagine. Questa perdita di qualità è di fatto legata anche alla complessità della scena ripresa nell'inquadratura e alle variazioni di illuminazione tra immagini successive.

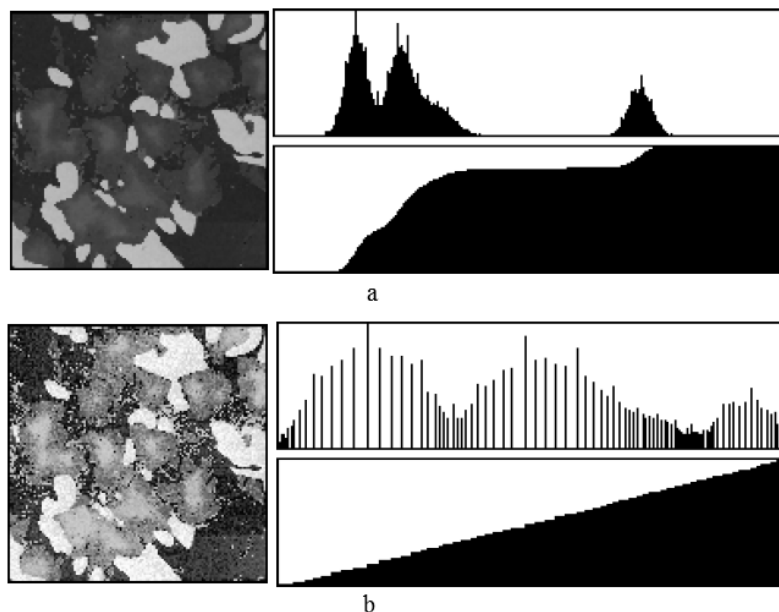


Figura 3.2 Confronto tra la stessa immagine B/N a 8 bit e i relativi istogramma ed istogramma cumulato, prima (figura a) e dopo l'equalizzazione (figura b). Si noti la maggior presenza di dettagli dovuta ad un maggior contrasto nell'immagine equalizzata.

La riduzione di questo parametro non dovrà quindi essere fatta in maniera arbitraria ma dovrà essere tale che per il valore di frame rate impostato il tempo di esposizione sia il massimo consentito. I valori di questi due parametri, infatti, devono essere impostati separatamente nel settaggio degli attributi della telecamera e non vengono aggiornati in automatico uno in funzione dell'altro anche se il valore del tempo di esposizione vincola il valore massimo impostabile di frame rate.

Essendo questi due parametri legati da una proporzionalità inversa si opererà di conseguenza.

L'aumento del frame rate è stato ottenuto riducendo il formato dell'immagine. La variazione di formato però è stata eseguita con modalità diverse per le due applicazioni in funzione dei vincoli progettuali dei sistemi di misura realizzati.

L'unico parametro del formato dell'immagine che ha influenza sul frame rate è l'altezza dell'immagine (Height), cioè il numero di righe dal quale è costituita. Lo standard video con cui opera la telecamera infatti prevede che la scansione e la memorizzazione dell'immagine avvenga per linea, per cui la temporizzazione associata alla scansione dell'immagine prevede che ad ogni linea venga attribuito un tempo per eseguire queste operazioni come frazione del tempo totale, indipendentemente dalla lunghezza della linea stessa.

Per quanto riguarda l'applicazione alla piegatura della lamiera è richiesto che la riduzione del formato d'immagine non comporti anche la riduzione del campo visivo. Il corrispondente programma LabVIEW realizzato si basa infatti sulla ricerca e la localizzazione dei bordi della lamiera quindi una riduzione di campo visivo ridurrebbe la zona accessibile di lamiera nell'immagine compromettendo la significatività dei risultati ottenuti.

Per operare la riduzione delle righe dell'immagine si è scelto dunque di sfruttare la funzione "Binning". Grazie a questa funzione la scansione dell'immagine viene eseguita sommando i valori di carica tra pixel adiacenti del sensore, dando un'immagine risultante a risoluzione inferiore senza però la variazione del campo visivo.

Questa funzione può essere implementata sia in direzione verticale, binning verticale, sia in direzione orizzontale, binning orizzontale.

Nel presente caso è stato sfruttato dunque il binning verticale che può essere impostato con valori interi che vanno da 1 a 8. Questa quantità esprime il numero di pixel adiacenti in direzione verticale che vengono conteggiati quando durante la scansione dell'immagine si esegue la somma delle cariche dei pixel in tale direzione.

Il binning orizzontale funziona in modo del tutto analogo però riduce il numero di colonne e quindi non comporta alcuna variazione della frequenza di acquisizione della telecamera.

Si riporta ora, in *Tabella 3.2*, i valori del frame rate in funzione del valore di binning impostato ed in *Figura 3.3* viene costruito il grafico del relativo andamento. Viene anche indicato il valore di tempo di esposizione che è consigliabile impostare negli attributi della telecamera per le ragioni sopra esposte.

Tabella 3.2 Variazione dei valori di formato dell'immagine e di frame rate in funzione del binning verticale. Nella colonna a destra sono indicati i valori di tempo di esposizione consigliati.

Formato Immagine	Image Height	Binning Verticale	Frame Rate Limite [fps]	Tempo Esposizione [ns]
1600x1200	1200	1	66,618	15011
1600x600	600	2	121,065	8260
1600x400	400	3	166,113	6020
1600x300	300	4	203,791	4907
1600x240	240	5	235,571	4245
1600x200	200	6	262,605	3808
1600x170	170	7	284,010	3521
1600x150	150	8	305,437	3274

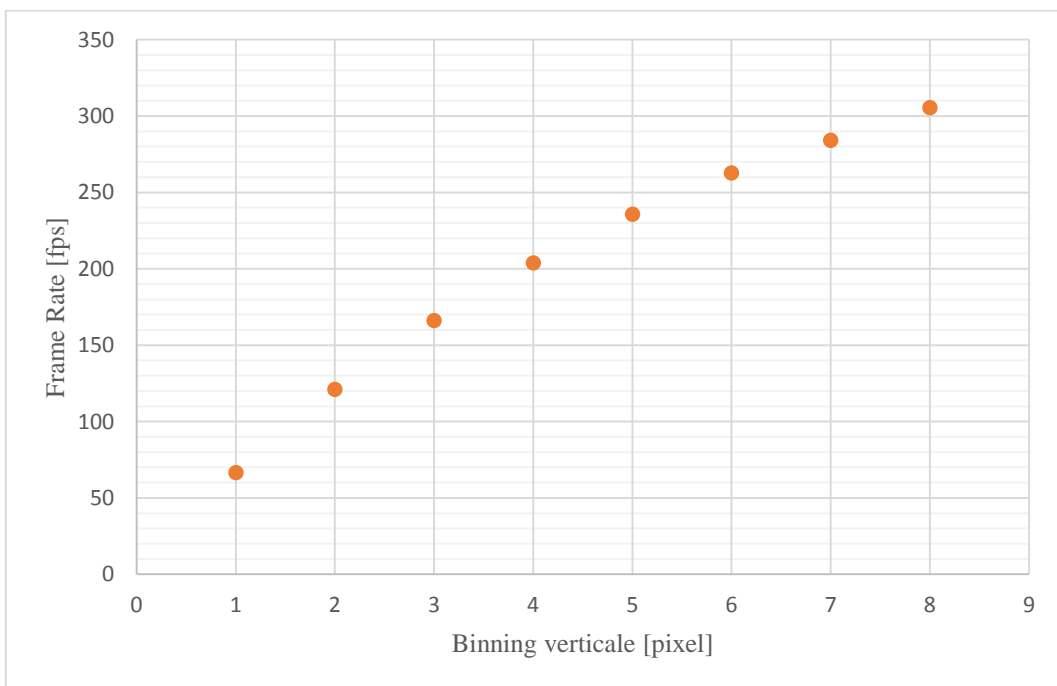


Figura 3.3 Grafico dell'andamento del frame rate in funzione del binning verticale.

Nell'applicazione di ricerca e matching dei marker, invece, si è preferito operare la riduzione del numero di righe dell'immagine andando a ridurre il campo visivo. In questo caso infatti l'unico vincolo che si ha per quanto riguarda una delle due dimensioni del campo visivo è quello che esso deve contenere la geometria del marker stesso più gli eventuali spostamenti in direzione parallela a quella di riduzione del formato.

Questa soluzione è stata scelta anche perché la riduzione di risoluzione dell'immagine in questo caso influirebbe in maniera negativa sia nella definizione della geometria del marker da ricercare

nell'immagine e nella fase di ricerca stessa e di matching; sia perché ridurrebbe la sensibilità di misurazione degli spostamenti.

La riduzione del formato dell'immagine in questo caso ha portato ai valori di frame rate riportati in *Tabella 3.3*, i valori sono più fitti nella zona in cui si è effettivamente operato. In *Figura 3.4* viene costruita la curva dell'andamento del frame rate in funzione dell'altezza dell'immagine.

Tabella 3.3 Variazione dei valori di frame rate in funzione della riduzione del campo visivo dell'immagine.

Formato Immagine	Image Height	Frame Rate Limite [fps]	Tempo Esposizione [ns]
1600x1200	1200	66,618	15011
1600x600	600	66,618	15011
1600x500	500	76,104	13140
1600x400	400	88,566	11291
1600x300	300	105,910	9442
1600x250	250	117,550	8507
1600x200	200	132,083	7571
1600x150	150	150,195	6658
1600x100	100	174,764	5722
1600x50	50	208,899	4787
1600x10	10	246,792	4052
1600x1	1	258,198	3873

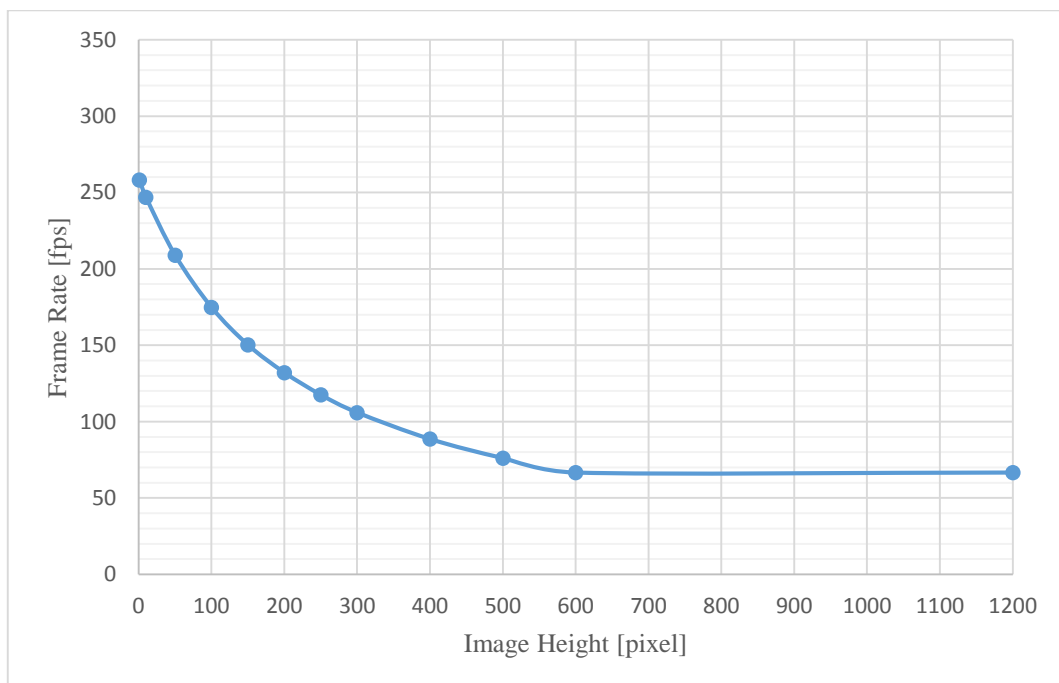


Figura 3.4 Andamento del frame rate in funzione dell'altezza del campo visivo dell'immagine.

In *Figura 3.5* viene presentato il confronto tra i valori di frame rate raggiunti sfruttando il binning verticale o variando il campo visivo a parità di formato d'immagine. Si noti che il campo visivo può essere variato con continuità a step di un pixel, mentre con il metodo del binning si ha un numero discreto e fisso di riduzioni. A parità di formato d'immagine con il binning verticale si possono raggiungere frame rate superiori mantenendo invariato il campo visivo a discapito però della risoluzione dell'immagine.

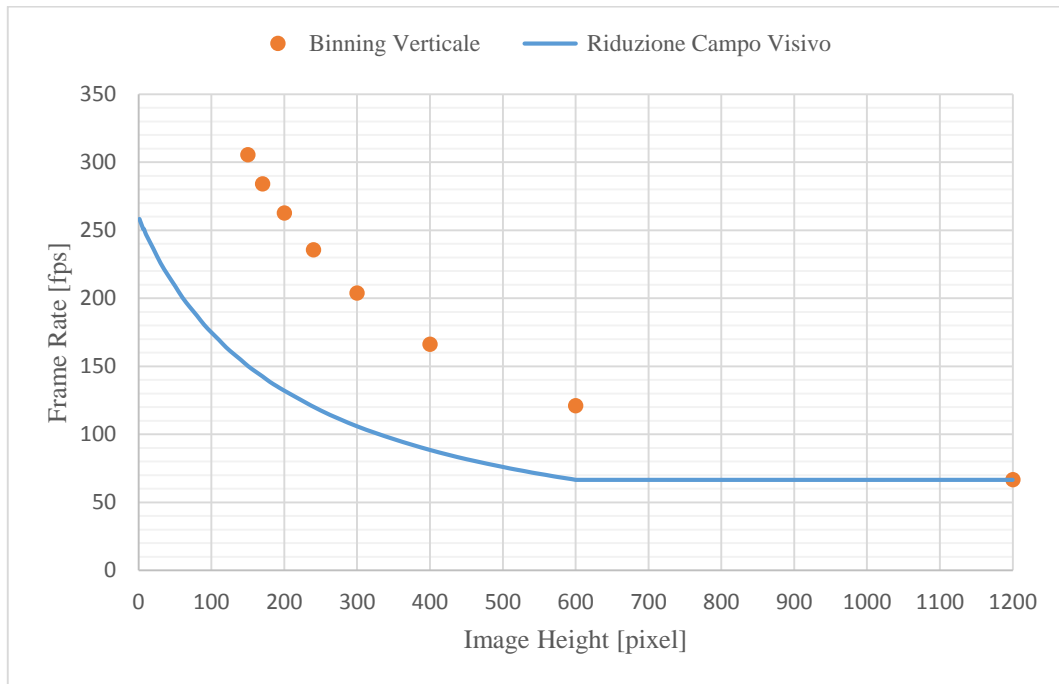


Figura 3.5 Confronto tra i frame rate raggiunti con i due metodi.

CAPITOLO 4

La piattaforma software: LabVIEW

4.1 Introduzione alla programmazione LabVIEW

LabVIEW (abbreviazione di **L**aboratory **V**irtual **I**nstrumentation **E**ngineering **W**orkbench) è l'ambiente di sviluppo integrato di *National Instruments* volto ad applicazioni principalmente orientate all'acquisizione e all'analisi di dati, al controllo di processi, alla generazione di rapporti e tutto ciò che concerne l'automazione industriale.

LabVIEW fornisce un ambiente di programmazione di tipo grafico denominato G-Language (Graphic Language). Un programma o sottoprogramma, denominato VI (Virtual Instrument), non esiste sotto forma di testo, ma può essere salvato solo come un file binario, visualizzabile e compatibile solo da LabVIEW.

La definizione di strutture, dati ed algoritmi avviene con icone ed altri oggetti grafici, ognuno dei quali incapsula funzioni diverse, uniti da linee di collegamento (wire), in modo da formare una sorta di diagramma di flusso. Tale linguaggio viene definito data flow (flusso di dati) in quanto la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso dei dati stesso attraverso i fili di collegamento monodirezionali che uniscono i blocchi funzionali. Un blocco viene eseguito solo quando tutti gli ingressi sono disponibili, una volta completata l'esecuzione fornisce i dati ai suoi terminali di uscita e li passa al nodo successivo nel percorso di flusso dei dati.

LabVIEW è completamente integrato per la comunicazione con l'hardware tipo GPIB, VXI, PXI, RS-232, RS-485 e dispositivi DAQ plug-in.

LabVIEW conserva comunque molte similitudini con gli ambienti di programmazione tradizionali (nei quali si generano programmi testuali con flusso di codice), infatti, presenta tutti i tipi di dati e gli operatori predefiniti di uso comune, permette di generare nuovi tipi di dati combinando tra loro i tipi di dati elementari e di controllare l'esecuzione dei programmi ricorrendo a strutture di controllo di flusso come ad esempio cicli e costrutti per l'esecuzione condizionale del codice.

La piattaforma mette inoltre a disposizione del programmatore una serie di librerie di funzioni che possono essere richiamate ed utilizzate all'interno dei programmi: le librerie comprendono funzioni di uso comune (funzioni aritmetiche e statistiche, funzioni di manipolazione di stringhe, eccetera) ed inoltre funzioni specializzate per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali, il controllo di strumentazione numerica via interfaccia IEEE-488 o VXI, la trasmissione di dati mediante l'uso di porte seriali oppure mediante il protocollo di comunicazione TCP/IP.

È possibile inoltre definire nuove funzioni ed arricchire le librerie in dotazione a LabVIEW.

Infine il programma consente di effettuare il debug delle applicazioni create in G-Language attraverso opportune modalità di esecuzione dei programmi, come ad esempio il modo "highlight execution" o "single step", e per mezzo di oggetti che consentono in run-time la modifica di variabili di programma.

Lab VIEW presenta alcuni vantaggi rispetto ad un linguaggio di programmazione tradizionale:

- È di facile apprendimento in quanto presenta una modalità di programmazione a blocchi di tipo visuale ed intuitivo.
- Permette di dare al codice una struttura modulare che consente di suddividere programmi complessi in sottoprogrammi più semplici che possono essere riutilizzati.
- Consente di raccogliere i VI in librerie, ovvero in un insieme di sub-VI utilizzabili da altri VI e velocemente inseribili nel codice sorgente dal programmatore.
- Fornisce un considerevole insieme di librerie per lo sviluppo di applicativi, tra le quali si trovano funzioni di tipo matematico e statistico, controllo di dispositivi per mezzo di alcuni interfaccia, comunicazione tra calcolatori, eccetera.

I programmi realizzati in LabVIEW, chiamati strumenti virtuali (VI, Virtual Instruments), contengono 3 componenti principali:

1. Il Front Panel (pannello frontale).
2. Il Block Diagram (diagramma a blocchi funzionale).
3. Il Connector Pane & Icon (il riquadro dei connettori e l'icona).

Il **Front Panel**, mostrato in *Figura 4.1*, è l'interfaccia utente del VI, questo viene realizzato con controlli ed indicatori che costituiscono rispettivamente i terminali interattivi d'ingresso e di uscita. I controlli sono potenziometri, pulsanti, manopole, matrici e molti altri dispositivi di ingresso. Gli indicatori sono grafici, LED, tabelle, termometri, display ed altri visualizzatori. I controlli simulano i dispositivi d'ingresso degli strumenti e forniscono dati allo schema a blocchi del VI. Gli indicatori simulano i dispositivi di uscita degli strumenti e visualizzano i dati che lo schema a blocchi acquisisce o genera.

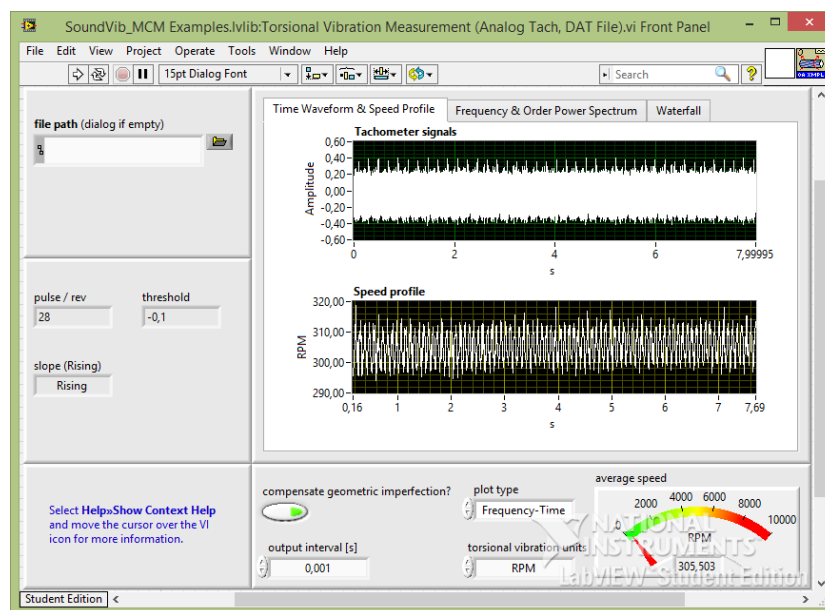


Figura 4.1 Esempio di un Front Panel.

Per inserire controlli ed indicatori nel Front Panel viene utilizzata la palette “Controls”. Questa è disponibile solo sul pannello frontale.

Dopo la costruzione del Front Panel viene scritto il codice sotto forma di diagramma a blocchi nell'ambiente del **Block Diagram**, illustrato in *Figura 4.2*. Questo è composto di nodi, terminali e collegamenti.

I nodi sono oggetti dello schema a blocchi che possiedono ingressi e/o uscite ed eseguono operazioni quando un VI è in esecuzione. I tipi di nodo comprendono le funzioni, i subVI e le strutture. Le funzioni sono elementi in esecuzione internamente, paragonabili con un operatore, una funzione o una dichiarazione. I subVI sono VI utilizzati nello schema a blocchi di un altro VI, paragonabili con le subroutine. Le strutture sono elementi di controllo del processo, come le strutture *Sequence*, *Case*, i cicli *For* o i cicli *While*. Per inserire i nodi nel Block Diagram viene utilizzata la palette “Functions” che è disponibile solo in questo ambiente di lavoro.

Gli oggetti del Front Panel appaiono come terminali nello schema a blocchi. Nel caso un terminale venga cancellato dal Front Panel questo scompare anche dal Block Diagram e viceversa. I terminali sono dunque porte di ingresso e di uscita che scambiano informazioni tra il pannello frontale e lo schema a blocchi.

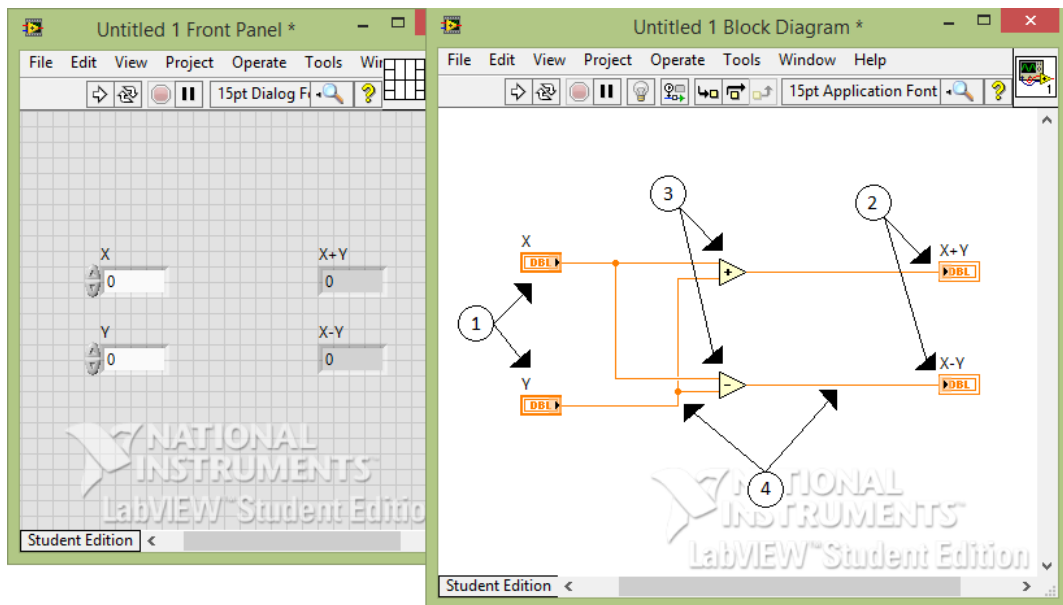


Figura 4.2 Esempio di Block Diagram. Nell'immagine si possono notare: 1- Terminali di controllo, 2- Terminali indicatori, 3- Nodi, 4- Collegamenti.

Il trasferimento dei dati tra gli oggetti dello schema a blocchi avviene attraverso i fili di collegamento. Ogni filo possiede un'unica sorgente di dati, ma può essere collegato a diverse funzioni o VI che leggono quel dato. I fili hanno colori, stili e spessori diversi in funzione del tipo di dato che trasportano (numerico intero o in virgola mobile, booleano, stringa, eccetera).

Una volta completati il Front Panel ed il Block Diagram si passa alla costruzione del **Connector Pane**, che consente di potere utilizzare il VI come subVI all'interno di un altro VI. Il riquadro dei connettori si trova in alto a destra del Front Panel, come si vede nella *Figura 4.3*. Esso definisce gli ingressi e le uscite che si possono collegare al VI per utilizzarlo come subVI. Un riquadro dei connettori riceve dati ai suoi terminali d'ingresso e passa i dati al codice dello schema a blocchi attraverso i controlli del pannello frontale e riceve i risultati ai suoi terminali di uscita dagli indicatori del pannello frontale.

Quando il VI corrente viene impiegato all'interno di un altro programma, come subVI, l'**Icon** permette di identificare il subVI stesso all'interno del Block Diagram del programma principale che lo contiene.

Il subVI viene collegato agli altri nodi dello schema a blocchi, in tal caso il connettore fissa la corrispondenza tra un'area dell'icona sulla quale viene eseguita la connessione ed uno degli elementi di ingresso o di uscita del Front Panel associato al subVI.

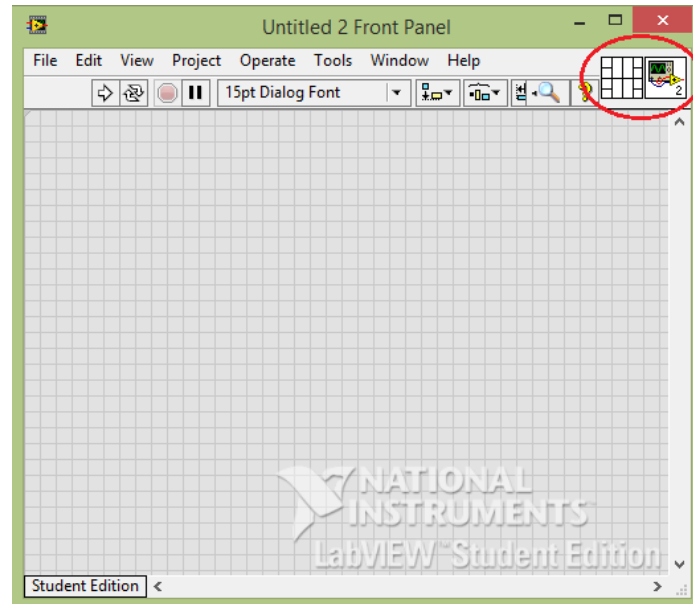


Figura 4.3 Connector Pane & Icon, cerchiati in rosso a sinistra il riquadro dei connettori e a destra l'icona.

Nella presente trattazione è stata utilizzata la versione di LabVIEW 2012 [18][19].

4.2 Sistemi di visione: il modulo NI Vision

Il modulo NI Vision di *National Instruments* è il driver software per l'acquisizione, la visualizzazione, la registrazione, l'elaborazione e il monitoraggio di immagini da un'ampia gamma di telecamere.

Questo software include NI-IMAQ, un driver per l'acquisizione da telecamere analogiche, digitali parallele, Camera Link ed NI Smart Camera. Inoltre include anche NI-IMAQdx, driver per l'acquisizione da telecamere USB3 Vision, GigE Vision (protocollo utilizzato dalla telecamera a disposizione), telecamere IIDC, IEEE1394; IP (Ethernet) e altri dispositivi DirectShow.

Questo modulo contiene i software NI Vision Assistant e NI Vision Acquisition oltre a contenere alcune librerie di funzioni per il processing di immagini e la visione artificiale per numerosi linguaggi di programmazione.

In queste librerie ci sono funzioni che permettono il miglioramento dell'immagine, la verifica di presenze/assenze di feature nell'immagine, l'individuazione di caratteristiche, l'identificazione di

oggetti, la misura di parti, l'ispezione visiva, la lettura di codici a barre ed altre funzioni di pattern matching. Le accuratèzze subpixel raggiunte nell'analisi delle immagini vanno al di sotto del decimo di pixel e del decimo di grado [20].

4.2.1 Cenni sull'acquisizione di immagini digitali

Il sistema di visione artificiale che verrà messo a punto deve avere una struttura che permetta l'acquisizione di immagini con una qualità sufficiente per poter estrarne l'informazione richiesta. A tale scopo vengono descritti i principali parametri che determinano le caratteristiche qualitative delle immagini digitali che devono essere considerate in fase di set-up del sistema di acquisizione [21][22]. Un'immagine digitale non è altro che un array 2D composto da elementi, chiamati pixel, che rappresentano la misura dell'intensità luminosa emessa da corpi nello spazio. Ad ogni pixel è quindi associata una posizione spaziale (x, y) ed un valore che rappresenta l'intensità luminosa, detto livello di grigio o di colore, a seconda che l'immagine sia o meno in bianco e nero.

I principali parametri da considerare nel set-up del sistema di acquisizione sono la risoluzione, l'ampiezza e la profondità del campo visivo, la distanza focale e le dimensioni del sensore. Questi concetti sono illustrati in *Figura 4.4*.

- Risoluzione

Esistono due concetti distinti di risoluzione da tenere in considerazione. Il primo è la "pixel resolution", questa consiste nel numero minimo di pixel necessari per rappresentare l'oggetto in esame senza perdere l'informazione rappresentata dai suoi dettagli. Tale valore può essere determinato considerando il particolare più piccolo da ispezionare. Generalmente è consigliato che il dettaglio di dimensioni più piccole sia rappresentato da almeno due pixel.

Il secondo tipo di risoluzione riguarda invece la quantità di dettagli che il sistema di visione può riprodurre. Tale concetto di risoluzione, più generale del primo, influisce profondamente sulle prestazioni del sistema di visione artificiale: una scarsa risoluzione genera immagini sfocate e senza dettagli. Tre parametri incidono sulla risoluzione: l'ampiezza del campo visivo, le dimensioni ed il numero di pixel del sensore.

- Ampiezza del campo visivo

L'ampiezza del campo visivo, pari alla superficie riprodotta dall'inquadratura, è un parametro strettamente legato alla pixel resolution. Infatti, analizzando lo stesso oggetto, se il campo visivo viene aumentato la pixel resolution diminuisce.

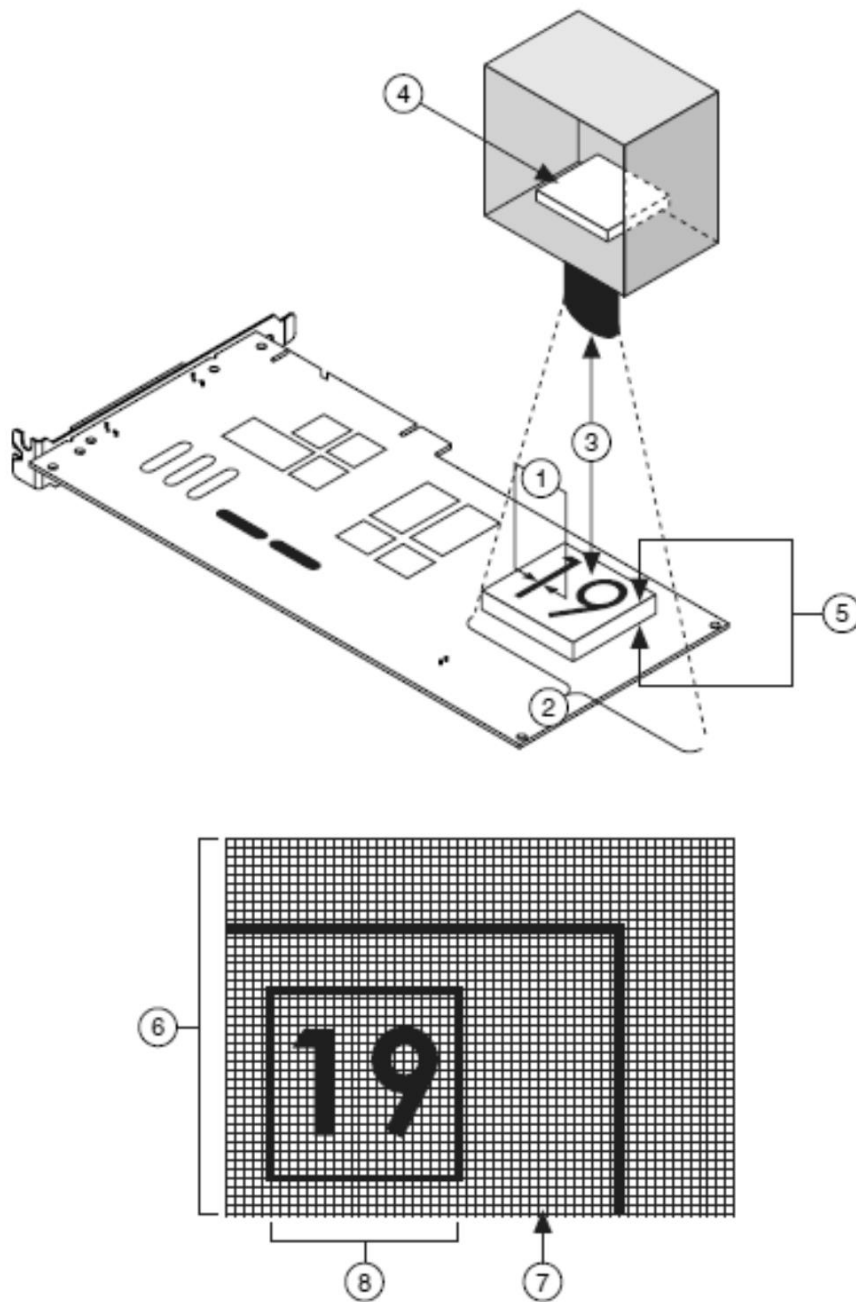


Figura 4.4 Principali parametri di un Imaging System. 1- Risoluzione, 2- Ampiezza del campo visivo, 3- Distanza focale, 4- Dimensioni del sensore, 5- Profondità del campo visivo, 6- Immagine, 7- Pixel, 8- Pixel resolution.

- Dimensioni e numero di pixel del sensore

La dimensione della superficie fotosensibile del sensore ottico è un parametro che determina l'ampiezza del campo visivo e, di conseguenza, è un elemento determinante nella definizione del numero minimo di pixel necessari per riprodurre tutti i dettagli dell'oggetto inquadrato. La dimensione del sensore è tipicamente indicata con la lunghezza della diagonale della superficie fotosensibile. Il numero di pixel del sensore deve essere uguale o maggiore del valore di pixel resolution.

- Lunghezza focale

Questo è il principale parametro che caratterizza la lente, infatti dalla lunghezza focale dipende la capacità di messa a fuoco della lente. Essa viene definita come la distanza tra il centro ottico della lente ed il piano focale nel caso in cui l'oggetto da mettere a fuoco sia posto all'infinito, quindi i raggi ottici sono paralleli all'asse del sistema, vedi *Figura 4.5*. In questo caso il piano focale coincide con il sensore fotosensibile della telecamera.

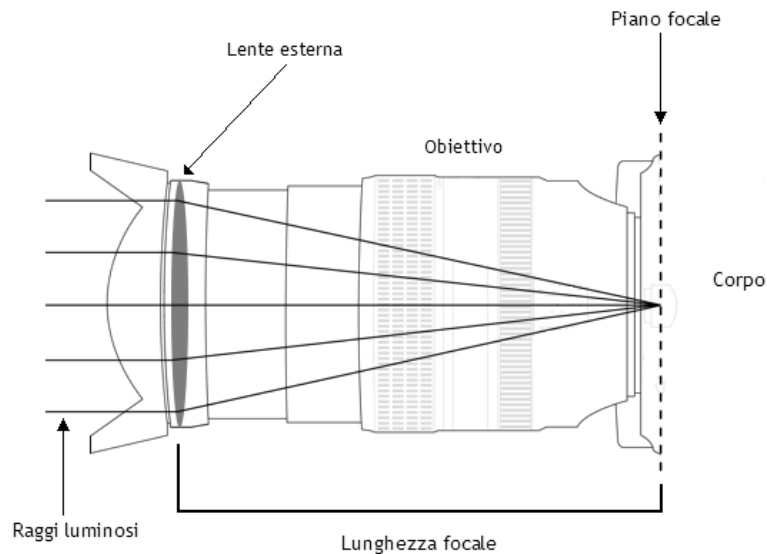


Figura 4.5 Lunghezza focale. La lente illustrata ha lunghezza focale variabile.

Da notare che la definizione fa riferimento al centro ottico della lente che non sempre coincide con il centro dell'obiettivo, infatti, un obiettivo composto da più lenti si comporta come una sola lente. Sono disponibili lenti a lunghezza focale fissa o variabile. Nelle prime si è vincolati dal punto di vista della distanza di lavoro (distanza tra il fronte della lente e l'oggetto sotto ispezione) e dell'ampiezza del campo visivo, mentre per le seconde, si ha la possibilità di ampliare o restringere il campo visivo inquadrato, il cosiddetto zoom, e la distanza di lavoro senza perdere la messa a fuoco del particolare d'interesse dell'oggetto.

- Profondità di campo

La profondità di campo è l'intervallo dei valori di distanza tra la lente e l'oggetto ripreso per cui quest'ultimo risulta avere una sfocatura impercettibile, o comunque accettabile.

Nelle applicazioni che verranno affrontate si cercherà di mantenere pressoché costante la distanza tra la lente e le feature di interesse per tutto il campo di spostamento di quest'ultime.

- Luminosità e contrasto

Un'importante caratteristica dell'immagine digitale è l'intensità media dei pixel che la compongono. Valori troppo elevati o troppo bassi di questo parametro causano saturazione, la quale si manifesta in un eccessivo numero di pixel bianchi o neri con conseguente perdita dell'informazione contenuta nell'immagine.

Nel set-up di un sistema di visione artificiale deve essere preso in considerazione il problema dell'illuminazione dell'oggetto in esame. Esistono in commercio diversi tipi di sistemi di illuminazione che oltre a mettere in risalto le feature di interesse nell'immagine devono essere compatibili, dal punto di vista dell'accessibilità e degli ingombri, con il sistema in esame.

Altro fattore determinante dal punto di vista della qualità dell'immagine acquisita è il contrasto. Questo consiste nella differenza dei valori di intensità luminosa tra l'oggetto ispezionato e lo sfondo. Il sistema di visione deve garantire valori di contrasto sufficientemente elevati da rendere possibile la netta distinzione dell'oggetto dallo sfondo, questa condizione viene raggiunta appunto tramite l'utilizzo di appropriate tecniche di illuminazione.

- Errori di prospettiva e distorsione

Gli errori di prospettiva si verificano quando l'asse ottico della telecamera non è perpendicolare alla superficie dell'oggetto inquadrato. Questo causa nell'immagine riprodotta variazioni di dimensioni di dettagli posti a diverse distanze dalla lente e quindi altera il contenuto informativo dell'immagine come si può notare in *Figura 4.6*.

La distorsione non lineare invece è una aberrazione geometrica causata da errori dell'ottica della telecamera. Generalmente le lenti introducono una distorsione radiale che fa sì che i punti lontani dal centro ottico della lente appaiano nell'immagine più lontani dal centro di quello che realmente sono. In *Figura 4.6-e* si può vedere l'effetto della distorsione su una griglia di punti.

Questi difetti compromettono le funzionalità del sistema di visione in cui le elaborazioni effettuate necessitano di trasformazioni delle lunghezze misurate in pixel in valori espressi con unità di misura più facilmente interpretabili (es. millimetri).

Nel caso in cui non si possa installare la telecamera perpendicolarmente all'oggetto da visualizzare viene introdotto un tipo di errore che può essere ridotto tramite un processo di calibrazione eseguito in fase di inizializzazione dell'applicazione software. Anche quando si verifica la distorsione le informazioni contenute dall'immagine vengono alterate per cui si rende necessaria la calibrazione spaziale dell'immagine per tenere conto di questo effetto.

La calibrazione verrà affrontata nel dettaglio all'interno del capitolo 5.

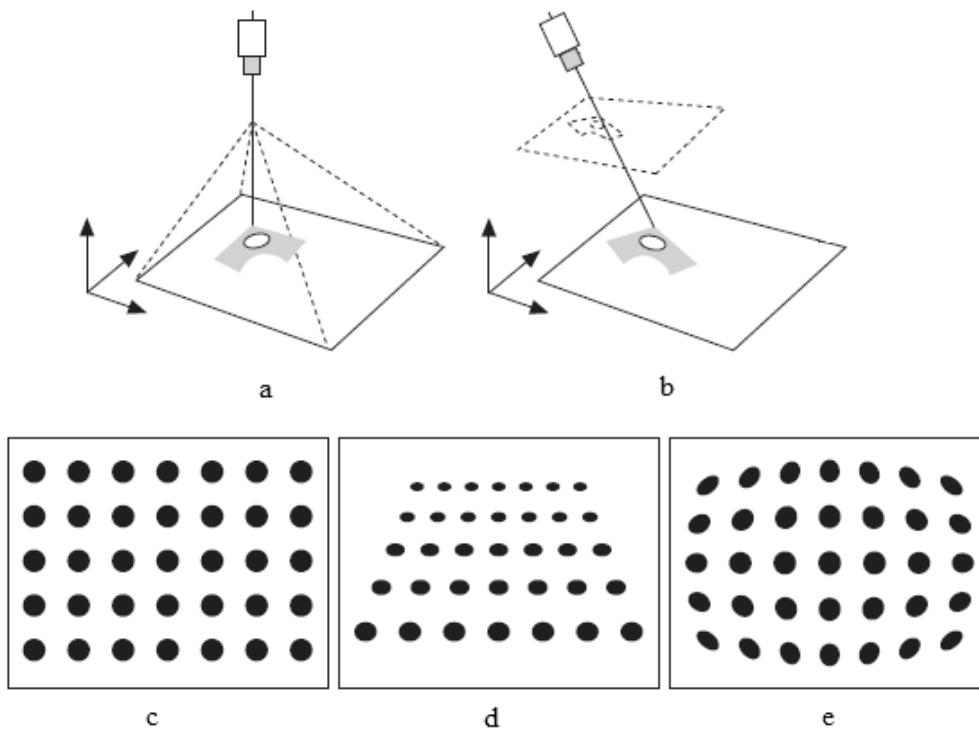


Figura 4.6 Difetti di prospettiva e distorsione dell'immagine. a) Allineamento perpendicolare tra telecamera ed oggetto. b) Allineamento tra telecamera ed oggetto non perpendicolare. c) Immagine di una griglia in assenza di errori. d) Errore di prospettiva nell'immagine della griglia. e) Errore di distorsione nell'immagine della griglia.

4.2.2 Introduzione alla programmazione: le librerie di NI Vision

Il modulo NI Vision mette a disposizione, nell'ambiente di programmazione LabVIEW, una libreria di funzioni che consentono l'acquisizione, l'analisi, l'elaborazione e la visualizzazione di immagini digitali.

Nel Front Panel, cliccando con il tasto destro del mouse in qualsiasi punto dell'area di lavoro, è possibile aprire un menu dal quale si può accedere alla palette *Vision*, mostrata in *Figura 4.7*. Da questa è possibile selezionare i controlli e gli indicatori che permettono di gestire gli input e gli output legati ai sistemi di visione dei programmi che si andranno a realizzare.

Il principale oggetto contenuto in questa sezione è il "Display". L'importanza di questo oggetto è legata al fatto che esso consente la visualizzazione dei dati. Si deve infatti mantenere una distinzione tra i concetti di *Image Processing* ed *Image Visualization*; il primo riguarda la creazione, l'acquisizione e l'analisi delle immagini mentre, il secondo, si riferisce al modo in cui i dati vengono presentati nell'immagine e al modo con il quale l'operatore può interagire con le immagini visualizzate. Il Display è dotato di una barra degli strumenti, chiamata "ROI tools", che permette di interagire con l'immagine digitale visualizzata sul display selezionando sulla stessa delle regioni di interesse (Region Of Interest, ROI) all'interno delle quali eseguire l'analisi, alleggerendo il computo

del calcolatore, o visualizzare i risultati. Queste ROI possono essere puntuali, lineari o superficiali. In quest'ultimo caso l'area individuata può essere costruita con diverse geometrie (rettangolare, ovale, anulare, poligonale, eccetera).

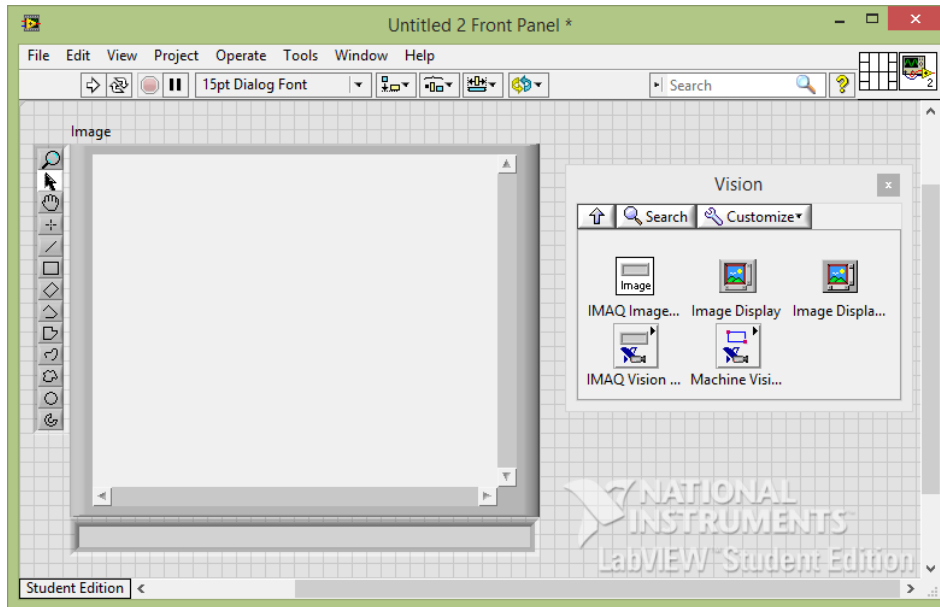


Figura 4.7 Palette Vision (a destra) e Display (a sinistra) nel Front Panel. A sinistra del Display si può notare la ROI Tools.

Spostandosi nella finestra del Block Diagram, cliccando con il tasto destro del mouse in qualsiasi punto dell'area di lavoro, si può aprire un menu dal quale si può accedere alla palette *Vision and Motion*, mostrata in Figura 4.8. Questa palette è una libreria di funzioni che comprende sia funzioni di programmazione di basso livello, che sono quelle utilizzate nel presente lavoro, sia funzioni di programmazione di alto livello. Queste ultime non si sono rivelate adatte agli scopi del lavoro in quanto, richiedendo un tempo di elaborazione maggiore di quelle di basso livello, rallentavano la velocità di esecuzione dei programmi realizzati. Per questo motivo non verranno presentate nella presente trattazione.

All'interno di NI-IMAQ e NI-IMAQdx sono raggruppate un set di funzioni che servono per il set-up del sistema di acquisizione e per l'acquisizione delle immagini tramite l'applicativo LabVIEW. Queste permettono inoltre di aprire e chiudere interfacce grafiche, memorizzare e decodificare le immagini. La ricezione del flussi video da telecamere National Instrument viene supportata da NI-IMAQ, mentre quella da telecamere universali (USB webcam, GigaBit Ethernet, FireWire IEEE1394, eccetera) viene supportata da IMAQdx.

Le funzioni implementate in queste librerie vanno dall'inizializzazione delle caratteristiche video dell'immagine all'acquisizione ad alta velocità. È anche possibile modificare dall'ambiente LabVIEW alcune impostazioni di set-up della telecamera, come luminosità, contrasto, formato

dell'immagine, tempo di esposizione, e/o ricevere dati allegati all'immagine durante il suo flusso nello schema a blocchi, tipo dati Timestamp o Template.

L'ottimizzazione dell'utilizzo delle risorse è garantito dal supporto per il DMA (Direct Memory Access) che massimizza la velocità di ricezione dei dati provenienti dalla periferica, e dall'utilizzo di librerie di funzioni di programmazione di basso livello caricate in modo dinamico, così da ridurre l'occupazione di memoria principale durante l'esecuzione dei VIs.

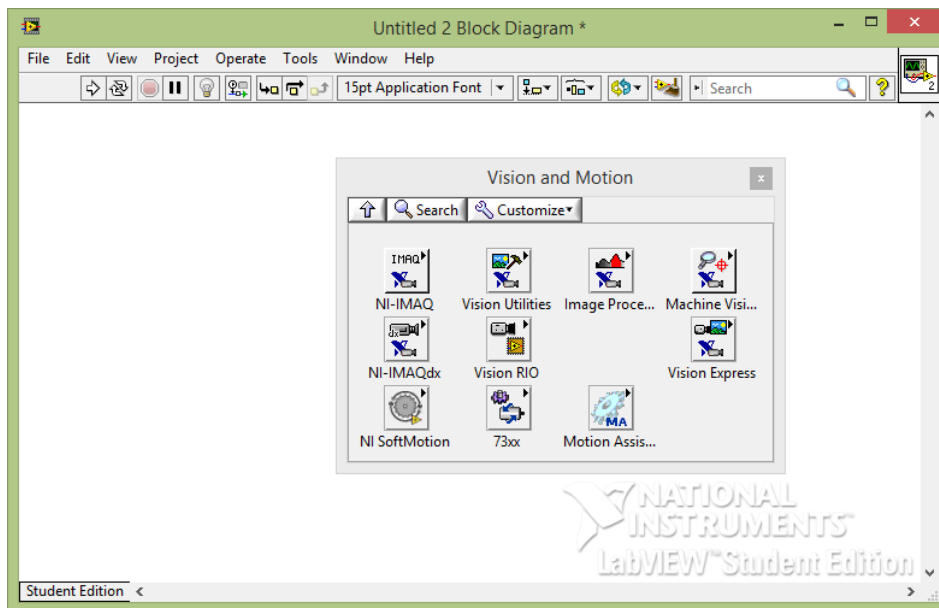


Figura 4.8 Palette Vision and Motion nel Block Diagram.

Le funzioni di elaborazione ed analisi delle immagini fornite da NI Vision sono divise in tre sottogruppi:

- **Vision Utilities:** comprende funzioni per la creazione e la manipolazione delle immagini acquisite. È possibile, ad esempio, eseguire traslazioni e rotazioni dell'immagine, definire regioni di interesse, sovrapporre all'immagine dei riferimenti, acquisire informazioni da altre immagini. Comprende anche la libreria di funzioni inerente alla calibrazione dell'immagine.
- **Image Processing:** comprende funzioni per l'analisi e l'elaborazione dell'immagine. È possibile misurare l'intensità dei livelli di grigio su ogni pixel, linea di pixel, o superficie; ricavare gli istogrammi, applicare filtri e sogliature (thresholding), confrontare immagini o applicare maschere e fare l'analisi dell'immagine nel dominio delle frequenze (FT).
- **Machine Vision:** comprende un insieme di algoritmi che realizzano effettivamente le operazioni comunemente richieste nelle applicazioni dei sistemi di visione. Sono

comprese le funzioni di *Edge Detection*, *Pattern Matching*, *Geometric Matching*, *Dimensional Measurements*, *Color Inspection*, *Optical Character Recognition* e *Instrument Readers*.

Nei paragrafi successivi verranno presentati più approfonditamente gli strumenti di *Edge Detection* e *Geometric Matching* [23] sui quali si è basata la realizzazione dei programmi per le applicazioni studiate.

4.2.3 Edge Detection

Gli strumenti di Edge Detection consentono di rilevare e localizzare i bordi degli oggetti lungo una linea di pixel nell'immagine.

Questi strumenti vanno a identificare e localizzare delle discontinuità dell'intensità di livello di grigio dei pixel nell'immagine. Queste discontinuità sono associate a bruschi cambiamenti dei valori di intensità dei pixel lungo una linea e sono caratteristiche dei confini di un oggetto contenuto nell'inquadratura.

Per rilevare i bordi in un'immagine si deve specificare una regione di ricerca nella quale applicare gli strumenti. L'area di ricerca può essere definita durante la programmazione oppure in modo interattivo. Quando questa viene definita in modo interattivo può essere usata la barra *ROI tools* per selezionare la zona di ricerca da analizzare. Nel caso, invece, la regione di ricerca venga definita durante la programmazione si ha la possibilità sia di mantenerla fissa all'interno dell'immagine, sia di fare dipendere la sua posizione da alcuni valori ricavati dagli step precedenti dell'esecuzione del VI. Ad esempio, è possibile ricercare il bordo in una porzione specifica dell'immagine che è stata precedentemente collocata utilizzando gli algoritmi di analisi delle particelle o di Pattern Matching. Una volta definita la regione di ricerca l'algoritmo di Edge Detection analizza i pixel in questa regione per l'individuazione del bordo. La ricerca può essere configurata in modo da trovare tutti i bordi, solo il primo bordo, solo l'ultimo oppure il primo e l'ultimo bordo all'interno dell'area definita.

Le funzioni di Edge Detection vengono tipicamente usate nelle seguenti tre aree applicative:

- **Gauging:** sono applicazioni volte all'esecuzione di misure dimensionali, come lunghezze, distanze, diametri, angoli, etc.; fatte allo scopo di verificare se il prodotto ispezionato rispetta o meno le specifiche di produzione, vedi *Figura 4.9-a*.

Queste applicazioni possono essere svolte sia inline che offline alla produzione.

I punti caratterizzanti il bordo trovati possono essere combinati per ricavare rette o linee interpolatrici (per individuare proiezioni, incroci, angoli, etc.), per individuare feature geometriche come cerchi, rettangoli, ellissi, poligoni e così via.

- **Detection:** sono applicazioni che hanno come obiettivo quello di stabilire se una parte dell'oggetto è presente o meno nell'inquadratura. Questa tecnica viene implementata andando a contare il numero di bordi individuati lungo un profilo e confrontando il risultato ottenuto con quello atteso, vedi *Figura 4.9-b*. Questo metodo, quando è possibile applicarlo, permette di alleggerire il lavoro del calcolatore rispetto a quello necessario per un matching.

Queste applicazioni riguardano anche l'individuazione di difetti strutturali, come cricche, graffi e macchie che possono essere rilevate in quanto danno luogo a discontinuità dell'intensità dei pixel.

- **Alignment:** sono applicazioni che vogliono andare a determinare la posizione e l'orientamento di un oggetto nell'immagine, vedi *Figura 4.9-c*. Infatti, l'oggetto da ispezionare potrebbe trovarsi in zone differenti dell'immagine tra una ispezione ed un'altra. Informazioni come posizione ed orientamento di un oggetto nell'immagine sono importanti perché permettono di ottenere i dati necessari per l'esecuzione di step successivi, ad esempio consente di individuarne la posizione esatta di un componente prima di eseguirne l'ispezione in modo tale si andrà poi ad ispezionare solo una regione di interesse.

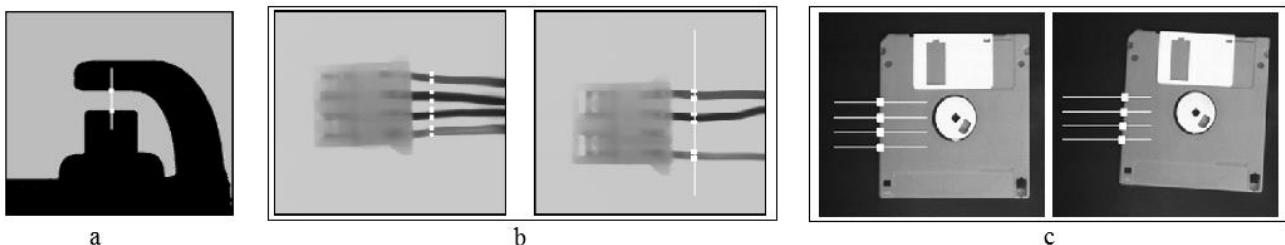


Figura 4.9 Principali aree applicative della Edge Detection. a) Gauging. b) Detection. Confronto tra un oggetto completo, nell'immagine di sinistra, ed uno incompleto, immagine di destra. c) Alignment. La figura mostra come la localizzazione del bordo sinistro dell'oggetto permette di determinarne la posizione e l'orientamento nell'immagine

Il bordo dell'oggetto, come detto sopra, viene individuato nell'immagine grazie ad un significativo cambiamento dell'intensità del livello di grigio tra pixel adiacenti. L' Edge Detection esegue dunque la ricerca del bordo su profili 1D di pixel (come linee rette, come mostrato in *Figura 4.10*; circolari, ellittiche, il contorno di un rettangolo o di un poligono o linee a geometria libera). Il software analizza le variazioni di intensità lungo questi profili per individuare le variazioni significative.

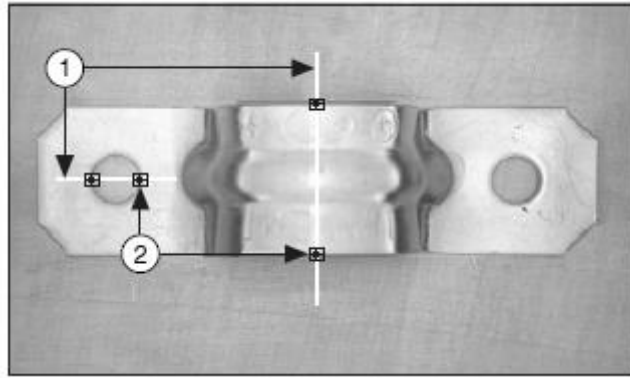


Figura 4.10 Esempio di Edge Detection. 1- Linee di ricerca. 2- Punti del bordo individuati.

Bisogna però specificare con quale criterio vengono stabilite le variazioni di intensità che costituiscono un bordo. Per fare ciò si fa riferimento al modello del bordo illustrato nella *Figura 4.11*.

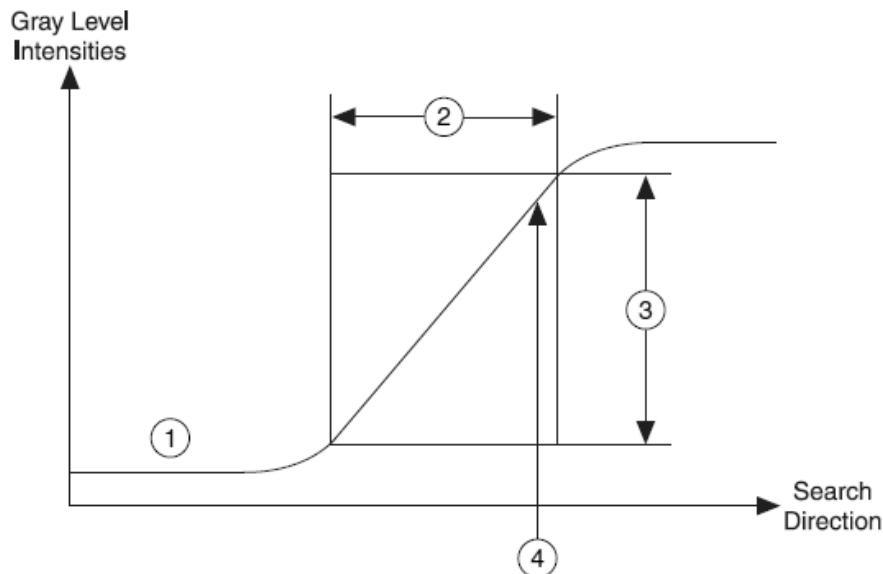


Figura 4.11 Modello del bordo. 1- Profilo di intensità del l.g.. 2- Edge Length. 3- Edge Strength. 4- Edge Location.

I principali parametri di questo modello sono:

- **Edge Strength**: definisce la minima differenza di intensità di livello di grigio (l.g.) tra bordo e sfondo. Questo parametro può variare in dipendenza delle variazioni di illuminazione e nel caso l'oggetto in esame abbia caratteristiche di livello di grigio variabili.
- **Edge Length**: definisce la massima distanza all'interno della quale deve aver luogo la variazione di l.g. tra bordo e sfondo.
- **Edge polarity**: definisce se il bordo è "crescente" o "decrescente", rispettivamente quando si ha un incremento o un calo di intensità di l.g. in corrispondenza del bordo.

- Edge Position: definisce le coordinate della posizione del punto del bordo.

Una volta impostato il valore di Edge Strenght si è definito, lungo il profilo 1D di ricerca, che quando questo valore verrà superato si è in presenza di un bordo. Per stabilire però la posizione esatta di questo punti del bordo bisogna specificare anche il criterio di localizzazione. I metodi utilizzati dal software sono il *Simple Edge Detection* e l'*Advanced Edge Detection*.

Nel Simple Edge Detection, mostrato in *Figura 4.12*, il software, per localizzare il bordo, scansiona il profilo 1D pixel per pixel dall'inizio alla fine. Un bordo "crescente" viene posizionato nel punto in cui, nel profilo di intensità del l.g., il valore di intensità supera un valore di soglia (Edge Strenght) più un certo valore di isteresi. Un bordo "decrescente" viene invece posizionato nel punto in cui l'intensità di l.g. scende sotto un valore di soglia meno il valore di isteresi.

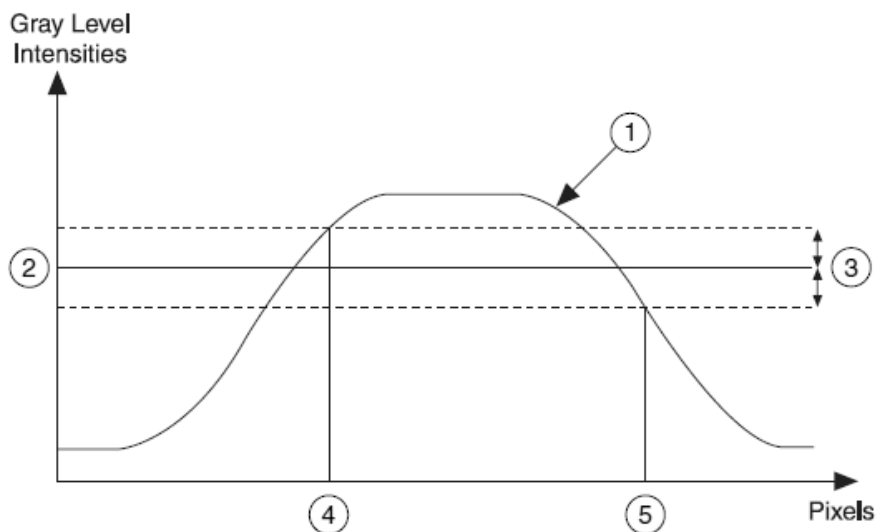


Figura 4.12 Simple Edge Detection. 1- Profilo di intensità del l.g.. 2-Valore di soglia (Edge Strenght). 3- Isteresi. 4-Posizione del bordo "crescente". 5- Posizione del bordo "decrescente".

Il Simple Edge Detection funziona bene quando si ha poco rumore nell'immagine e si ha una chiara distinzione tra oggetto e sfondo.

Nell'Advanced Edge Detection, mostrato in *Figura 4.13*, il software scansiona il profilo 1D pixel per pixel e in ogni punto va a calcolare il valore del contrasto. Questo viene calcolato come differenza tra il valore medio dell'intensità di l.g. di alcuni pixel che precedono quello in esame e il rispettivo valore medio di alcuni pixel successivi. Il numero di pixel che viene preso in considerazione per calcolare l'intensità media viene stabilito in fase di settaggio della funzione attraverso il parametro *Width*. Se il contrasto calcolato nel pixel in esame supera un valore minimo, stabilito con l'Edge Strenght, questo punto viene tenuto in memoria per un'ulteriore analisi. A partire da questo pixel si prosegue con l'analisi finché il valore di contrasto raggiunge il suo massimo, questo punto viene fissato come

punto iniziale del bordo. Da qui, attraverso il parametro *Steepness*, si torna indietro per fissare la posizione finale del bordo. In questo intervallo di pixel la posizione del bordo viene fissata nel primo punto in cui la differenza tra l'intensità del punto stesso e quella del punto iniziale del bordo, è maggiore o uguale al 90% del valore della differenza tra le intensità del punto iniziale e di quello finale.

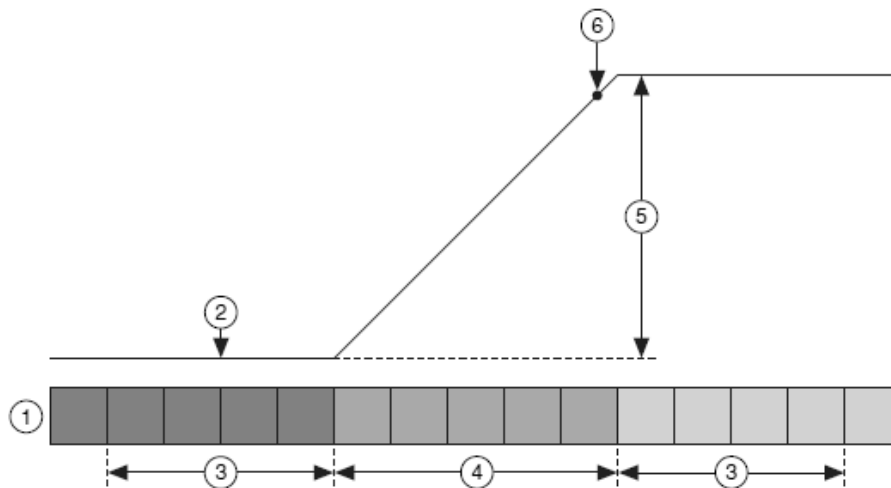


Figura 4.13 Advanced Edge Detection. 1- Pixel. 2- Intensità di l.g.. 3- Width. 4- Steepness. 5- Contrasto. 6- Posizione del bordo.

Il posizionamento del bordo può essere calcolato sia con una accuratezza legata alla dimensione del pixel, sia con accuratezza maggiore sfruttando tecniche subpixel. In questo caso il software va a costruire una funzione interpolatrice (quadratica, cubica o di ordine superiore) per i punti del profilo di intensità di l.g.. La funzione interpolatrice fornisce dunque delle stime dei valori di intensità di l.g. anche nelle posizioni intermedie tra un pixel e l'altro, vedi *Figura 4.14*.

Sfruttando le tecniche subpixel, gli algoritmi di Edge Detection vengono applicati alla funzione interpolatrice consentendo il posizionamento del bordo con continuità lungo tutto il profilo 1D e non solo a step di un pixel.

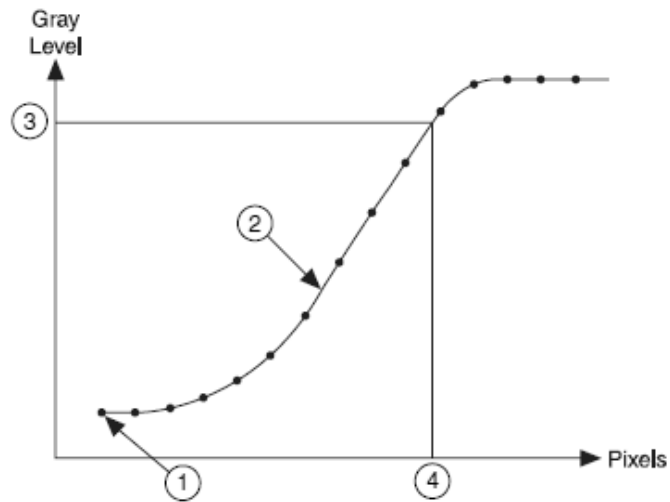


Figura 4.14 Applicazione di tecniche subpixel. 1- Valori noti dei pixel di intensità di l.g.. 2- Funzione interpolatrice. 3- Valore di intensità di l.g. interpolato. 4- Posizionamento subpixel.

Lo strumento di Edge Detection dell'IMAQ Vision esegue la ricerca su profili 1D; grazie ad alcuni strumenti si è però in grado di estendere la ricerca ad aree bidimensionali. Queste aree di ricerca 2D vengono coperte da linee di ricerca monodimensionali sulle quali viene eseguito il rilevamento dei punti del bordo. Si ha la possibilità di controllare il passo tra le linee di ricerca in modo da infittire i punti rilevati sul bordo.

Gli strumenti per la ricerca su aree bidimensionali sono i seguenti:

- **Strumento Rake:** opera su un'area di ricerca rettangolare, lungo linee parallele ai lati del rettangolo. La densità delle linee di ricerca viene impostata stabilendo il passo in pixel tra le linee. È possibile specificare la direzione di ricerca; da sinistra a destra, da destra a sinistra, dall'alto al basso e dal basso all'alto.

Il funzionamento di questo strumento è mostrato in *Figura 4.15*.

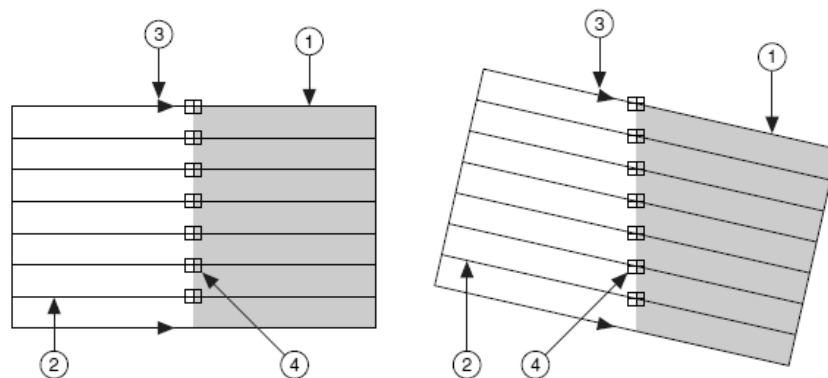


Figura 4.15 Strumento Rake. 1- Area di ricerca. 2- Linee di ricerca. 3- Direzione di ricerca. 4- Punti del bordo individuati.

- **Strumento Spoke:** opera su un'area di ricerca circolare o anulare, lungo linee di ricerca disposte in direzione radiale. La densità delle linee di ricerca viene stabilita impostando l'angolo tra le linee. È possibile, inoltre, impostare la direzione di ricerca; dal centro verso il bordo esterno dell'anello o dall'esterno al centro.

Il funzionamento di questo strumento è illustrato in *Figura 4.16*.

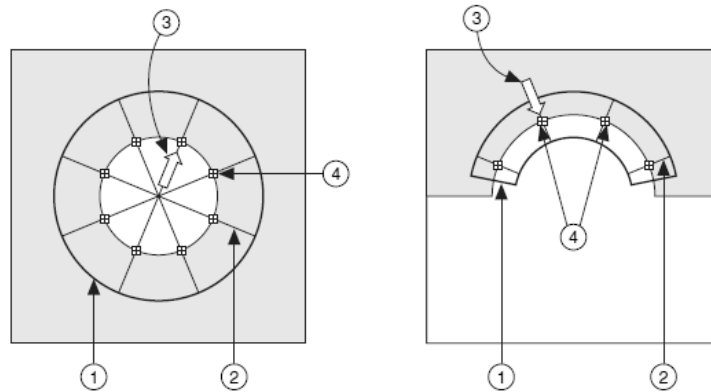


Figura 4.16 Strumento Spoke. 1- Area di ricerca. 2- Linee di ricerca. 3- Direzione di ricerca. 4- Punti del bordo individuati.

- **Strumento Concentric Rake:** è un'alternativa dello strumento Rake. Opera anch'esso su un'area di ricerca circolare o anulare solo che le linee di ricerca sono concentriche al contorno esterno dell'area selezionata. La densità delle linee di ricerca viene stabilita impostando il passo radiale in pixel tra le linee. È possibile impostare come direzione di ricerca il verso orario o quello antiorario.

Il funzionamento dello strumento è mostrato in *Figura 4.17*.

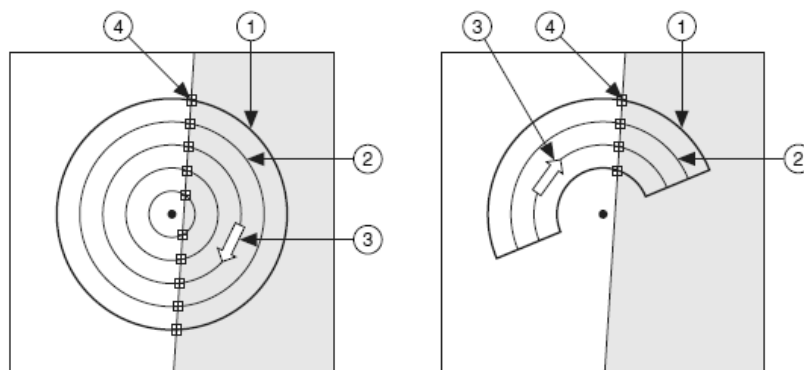


Figura 4.17 Strumento Concentric Rake. 1- Area di ricerca. 2- Linee di ricerca. 3- Direzione di ricerca. 4- Punti del bordo individuati.

Una volta individuati i punti del bordo questo viene costruito facendo un fitting dei punti trovati. Si prenda in considerazione un bordo lineare, come avviene nell'applicazione studiata relativamente alla piegatura della lamiera, dove, per calcolare l'angolo tra due bordi dell'oggetto, è necessario prima individuare due rette che rappresentino i due bordi. Nel caso ideale i punti del bordo rilevati stanno su una linea dritta, nella realtà però questo non avviene per vari motivi. Innanzitutto il bordo dell'oggetto non è realmente una linea continua dritta ma ha un profilo stocastico, altra causa può essere il fatto che il bordo non è contenuto interamente nell'area di ricerca dello strumento Rake. Anche il rumore nell'immagine può causare spostamenti dei punti rilevati. L'algoritmo per il fitting dei punti utilizzato dal modulo IMAQ Vision restituisce risultati più accurati rispetto agli algoritmi di fitting tradizionali.

IMAQ Vision costruisce la linea sulla base del fatto che considera che un punto fa parte della linea stessa soltanto se cade all'interno di una certa distanza, definita dall'utente, dalla linea costruita fino a quel momento. L'algoritmo di fitting dunque costruisce la linea solo su un sottoinsieme dei punti rilevati, quelli che cadono su una linea praticamente retta, vedi *Figura 4.18*. L'IMAQ Vision determina poi la qualità della linea misurando la distanza ai minimi quadrati media (MSD), cioè la media dei quadrati delle distanze di ogni punto dalla linea stimata. L'algoritmo procede al calcolo della retta con la minima MSD che rappresenta la retta di migliore qualità. Poi vengono rimossi i punti più lontani, fuori dalla distanza di soglia, e viene ripetuto il procedimento finché non si arriva ad ottenere la retta che interpola solo i punti più significativi ed ignora quelli più lontani, vedi *Figura 4.19*.

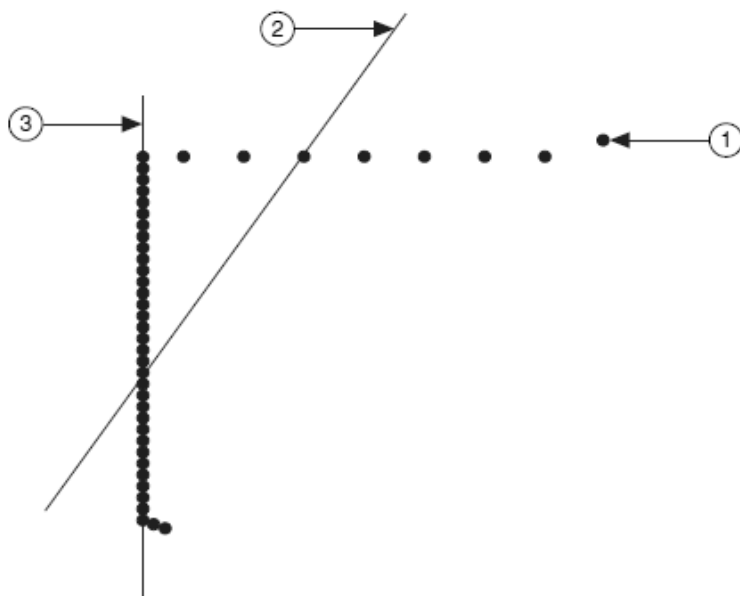


Figura 4.18 Confronto tra l'algoritmo di line fitting tradizionale e quello implementato da IMAQ Vision. 1- Punti del bordo. 2- Linea algoritmo standard. 3- Linea algoritmo IMAQ Vision.

È molto importante la scelta dell'utente riguardo la distanza limite dei punti dalla retta stimata che farà da discriminante perché i punti stessi vengano considerati o meno per la stima della retta. L'algoritmo, infatti, restituisce la retta per la quale si ha il maggior numero di punti validi, cioè che sono entro la distanza di soglia. Questa retta è detta *Strongest Line Fit*.

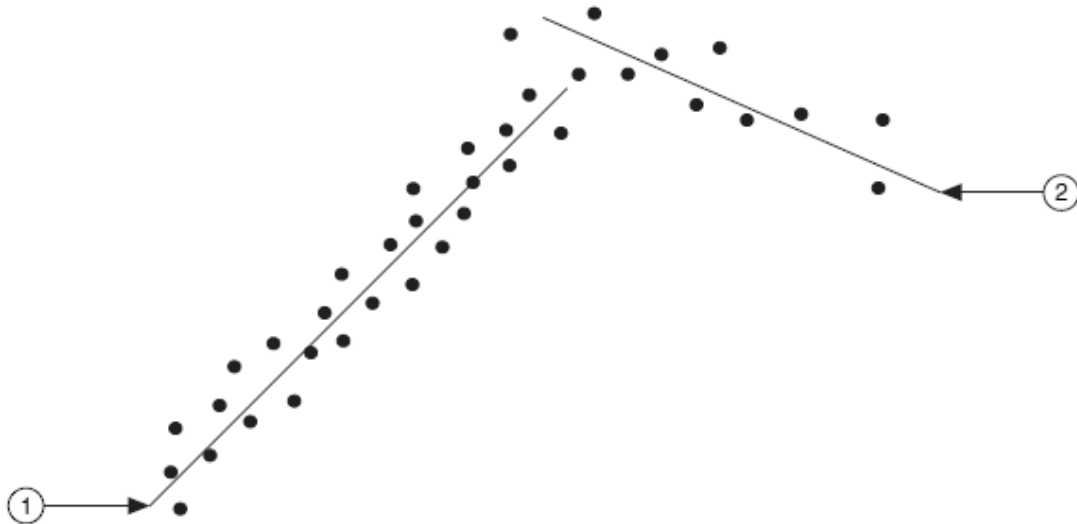


Figura 4.19 Strongest Line Fit. 1- Strongest Line Fit, è quella che viene restituita dall'algoritmo. 2- Linea alternativa scartata dall'algoritmo in quanto costituita da meno punti validi.

Per garantire la qualità della retta stimata è inoltre possibile definire un punteggio minimo che deve avere la retta stimata per essere accettabile. Se non è possibile individuare una retta che raggiunga tale punteggio l'algoritmo non restituirà nessun risultato.

Infine, per non rendere troppo oneroso in termini di tempo il compito del calcolatore, è possibile stabilire un numero massimo di iterazioni compiute per la ricerca della retta con il minimo MSD. Una volta raggiunto il numero massimo di iterazioni viene restituita la retta di miglior qualità, nel caso che questa superi il punteggio di soglia.

4.2.4 Geometric Matching

Gli strumenti di Geometric Matching consentono di localizzare le regioni di un'immagine in scala di grigio che corrispondono ad un modello di riferimento. Sono dunque strumenti specializzati ad individuare la posizione e l'orientamento di un modello caratterizzato da una geometria distinta o da informazioni di forma specifiche.

Quando si vuole utilizzare il Geometric Matching è necessario prima creare il modello rappresentativo della feature ricercata nell'immagine. La Machine Vision cercherà poi delle

corrispondenze in ogni immagine ispezionata, o all'interno di una regione di interesse specificata, e restituirà per ogni riscontro un punteggio. Questo punteggio esprime il grado di corrispondenza della feature individuata nell'immagine con quella di riferimento.

La funzione di Geometric Matching restituisce le seguenti informazioni: il numero dei riscontri con il modello individuati, la posizione e l'orientamento di ognuno di questi e la loro scala rispetto l'immagine di modello.

Il Geometric Matching consente di localizzare le feature cercate nell'immagine anche nel caso di variazioni delle condizioni di illuminazione, di rumore, di sfocatura, nel caso di occlusioni nell'immagine e nel caso di traslazioni e rotazioni della feature, di variazioni di scala e di variazioni di background rispetto al modello, vedi *Figura 4.20*.

Le funzioni di Geometric Matching vengono utilizzate principalmente nelle seguenti aree applicative:

- **Gauging:** applicazioni che hanno come scopo l'esecuzione di misure dimensionali, come lunghezze, distanze, diametri, angoli ed altre dimensioni critiche, fatte allo scopo di verificare se il prodotto ispezionato rispetta o meno le specifiche di produzione.

Il Geometric Matching consente di localizzare in modo certo l'oggetto e le aree dell'oggetto che interessano la misurazione. Si può anche sfruttare l'informazione di output inerente alla scala della feature individuata per stabilire se questa è troppo grande o troppo piccola rispetto le specifiche.

- **Inspection:** sono applicazioni volte all'individuazione di semplici difetti, come graffi, parti mancanti, stampa su oggetti illeggibile, eccetera. Viene sfruttato il punteggio sull'occlusione (restituita in output dalla funzione) per determinare se ci sono parti mancanti; si utilizza anche il punteggio di corrispondenza per confrontare il contorno della feature individuata con quella di riferimento per individuare gli errori.
- **Alignment:** viene determinata la posizione e l'orientazione dell'oggetto individuato andando a localizzare i punti di riferimento o le caratteristiche dell'oggetto.
- **Sorting:** sono applicazioni che permettono di ordinare gli oggetti in base alla forma e/o alle dimensioni.

Gli oggetti vengono localizzati dalle funzioni di Geometric Matching anche quando questi appaiono ruotati nell'immagine, in scala o occlusi. Verranno dunque restituite in output per ogni oggetto riscontrato, oltre alle informazioni sopracitate, il numero di oggetti trovati, il fattore di scala dimensionale e la percentuale di occlusione di ogni unità.

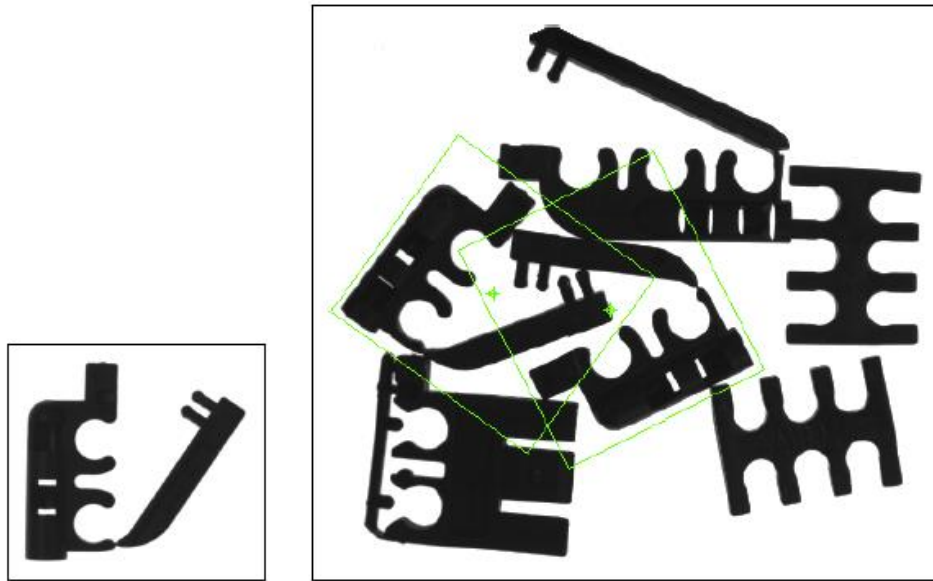


Figura 4.20 Esempio di applicazione del Geometric Matching. Nel riquadro a sinistra è mostrato il modello mentre a destra si può vedere la localizzazione dell'oggetto nell'immagine.

Un aspetto importante per le presenti applicazioni è legato al fatto che, anche se il modello da ricercare è ben definito dal punto di vista geometrico, se l'immagine da ispezionare contiene un numero elevato di bordi le performance dell'algorithm di Pattern Matching vengono rallentate. Infatti, l'algorithm di ricerca va ad estrarre le informazioni per il matching da ogni bordo individuato.

L'algorithm di Geometric Matching usa per il confronto le informazioni di intensità di l.g. dei pixel dell'immagine del modello. Come primo elemento di confronto vengono utilizzate le caratteristiche geometriche del modello, queste si suddividono in caratteristiche di basso livello, come bordi e curve, vedi *Figura 4.21-a*; e caratteristiche di alto livello, come le forme geometriche costruite dalle curve del modello, vedi *Figura 4.21-b*.

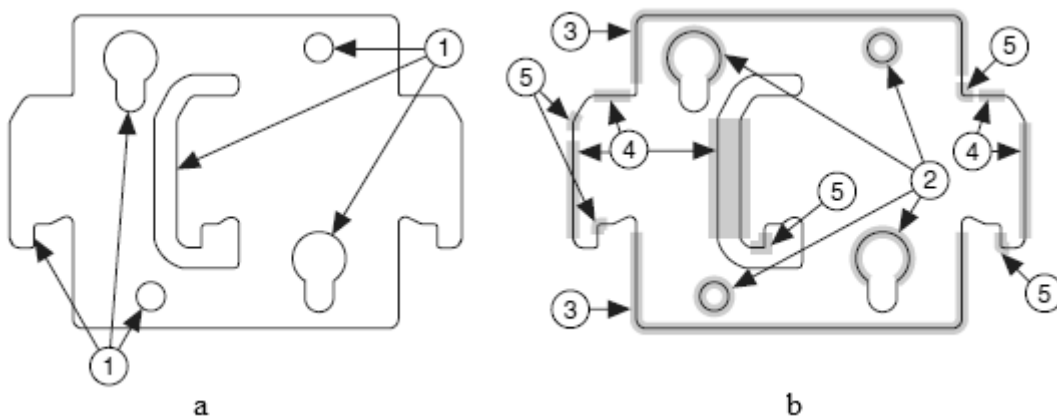


Figura 4.21 Informazioni geometriche di basso ed alto livello usate nel Geometric Matching. 1- Curve. 2- Feature Circolari. 3- Feature Rettangolari. 4- Feature Lineari. 5- Angoli.

Il processo di Geometric Matching è composto da due fasi. Una parte di learning, cioè di apprendimento della geometria del modello, durante la quale le feature vengono organizzate, classificate e memorizzate assieme alle relazioni spaziali tra queste feature in modo da facilitarne la ricerca nelle immagini ispezionate. Le informazioni acquisite in questa fase vengono memorizzate e trasferite in allegato all'immagine del modello. La parte seconda parte è quella del matching in cui vengono estratte le caratteristiche geometriche dell'immagine per confrontarle con i modelli spaziali dell'immagine di riferimento.

La fase di learning studia l'immagine che riporta il modello fisico e si suddivide in tre stage:

- **Curve Extraction:** è il processo che porta ad individuare le curve presenti nell'immagine. Una curva è un insieme di punti del bordo connessi in modo da formare una linea di contorno continua. Le curve rappresentano tipicamente il contorno della parte inquadrata. Il processo di Curve Extraction si divide a sua volta in tre parti, come mostrato in *Figura 4.22*:
 - **Finding Curve Seed Points:** un *seed point* è un punto della curva dal quale comincia la stessa. Per essere qualificato come tale, un pixel, oltre a non dovere già appartenere ad un'altra curva, deve avere un valore di contrasto superiore ad una certa soglia impostata dall'utente. Il valore del contrasto viene calcolato tenendo conto dell'intensità di l.g. del pixel e delle intensità dei pixel adiacenti. Per rendere più veloce l'algoritmo di curve Extraction la ricerca dei seed point non avviene su tutti i pixel ma solo su un certo numero di essi definito impostando un passo sulle righe e uno sulle colonne per impostare le linee su cui viene effettuata la ricerca. Il passo nelle due direzioni deve essere più piccolo della curva minima nella rispettiva direzione.
 - **Tracing the Curve:** a partire da un seed point viene tracciato il resto della curva. Con questo processo un pixel confinante con l'ultimo della curva, nel caso abbia un contrasto sopra il valore di soglia per i bordi, viene aggiunto alla curva stessa. Questo processo viene ripetuto finché non ci sono più pixel che possono essere aggiunti alla curva. L'algoritmo poi torna al seed point e prova a ritracciare la curva nella direzione opposta.
 - **Refining the Curve:** in questo passaggio del Curve Extraction l'algoritmo combina le curve in una più grande quando queste sono abbastanza vicine tra loro; chiude le curve quando i seed point sono sotto ad una certa distanza e rimuove le curve che non superano una certa dimensione di soglia definita dall'utente.

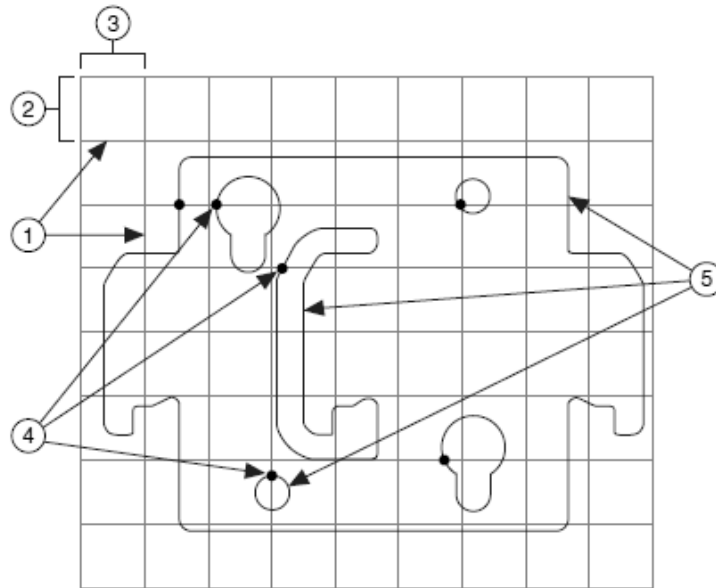


Figura 4.22 Curve Extraction. 1- Linee di ricerca. 2- Passo sulle righe. 3- Passo sulle colonne. 4- Seed Points. 5- Curve.

- **Feature Extraction:** è il processo di estrazione delle caratteristiche geometriche di alto livello dell'immagine a partire dalle informazioni ottenute dal Curve Extraction. Le feature di alto livello sono: linee, rettangoli, cerchi, angoli.

Prima l'algoritmo cerca di approssimare tutte le curve usando linee poligonali, poi utilizza i segmenti che formano la poligonale per creare feature lineari o angolari che verranno a loro volta utilizzate per la costruzione di feature rettangolari. Le curve che non possono essere ben approssimate con le poligonali vengono usate per l'estrazione di feature circolari.

Dopo l'estrazione delle feature di alto livello dall'immagine del modello, le caratteristiche geometriche vengono ordinate in base ai seguenti criteri:

- Type: linee, rettangoli, angoli o cerchi.
- Strenght: quantifica la precisione con cui le feature riproducono date strutture geometriche.
- Saliency: quantifica la qualità con cui le feature descrivono il modello.

Dopo averle ordinate, vengono scelte le feature che meglio riproducono il modello.

- **Representation of Spatial Relationships:** è il processo che rileva le relazioni spaziali tra due caratteristiche geometriche. Queste relazioni descrivono come ogni feature del modello è posizionata nello spazio rispetto alle altre. L'algoritmo usa queste relazioni per costruire un *Template Model*, cioè un modello di feature che descrive l'immagine del modello fisico. Per la ricerca dei riscontri viene poi utilizzato il *Template Model* così costruito.

La parte di matching, invece, si suddivide in cinque stage. Questa viene eseguita sulle immagini da ispezionare. I primi due che vengono realizzati sono il Curve Extraction ed il Feature Extraction e sono del tutto analoghi a quelli realizzati per l'immagine del modello durante la fase di learning. Gli altri tre sono:

- **Feature Correspondence Matching:** è il processo di ricerca, nell'immagine ispezionata, di feature simili a quelle del modello, chiamate *Target Feature*. L'algoritmo crea una lista di possibili corrispondenze al modello nell'immagine ispezionata ed aggiunge informazioni, come posizione, orientamento e scala, alle potenziali corrispondenze.
- **Template Model Matching:** è il processo di sovrapposizione del *Template Model* ricavato nella fase di learning con le potenziali corrispondenze rilevate nell'immagine ispezionata per appurare se queste esistono o meno. Confrontata la presenza delle feature si analizzano altre informazioni come le relazioni spaziali tra le feature per avere la conferma del matching. In caso affermativo, i dati vengono registrati e passati allo step successivo.
- **Match Refinement:** è il processo di controllo finale del matching in cui le varie informazioni, sia del modello sia delle corrispondenze, vengono raffinate per il confronto tra dati con maggiore accuratezza.

4.3 Descrizione dei programmi realizzati

In questa sezione vengono presentati i programmi, realizzati tramite il software LabVIEW, che sono stati implementati per l'acquisizione dei dati rispettivamente nelle applicazioni di piegatura della lamiera e in quella di individuazione dei marker apposti sugli stampi della pressa.

Verranno esposti la logica di programmazione, cioè il diagramma a flusso costruito per il data flow durante l'esecuzione del programma; i criteri usati per la programmazione ed eventuali vincoli che si sono dovuti tenere in considerazione. Verranno anche presentati il Block Diagram ed il Front Panel dei vari programmi per rendere più chiara la descrizione sia delle funzioni svolte dalle varie parti di codice, sia dei parametri che devono essere definiti dall'utente per il corretto funzionamento.

Per tutti i programmi realizzati è stato utilizzato un linguaggio di programmazione di basso livello allo scopo di avere molto più controllo, oltre a velocità ed efficienze più elevate, rispetto alle librerie *Express* fornite dal software. Le funzioni di questo tipo richiedono però una programmazione più dettagliata e precisa. Questo, tuttavia, ha permesso di ottenere una velocità di elaborazione dei dati

maggiore di quella di acquisizione della telecamera. La velocità massima di esecuzione del programma in real-time dunque dipende unicamente dal frame rate effettivo della telecamera per la data configurazione impostata per l'acquisizione.

4.3.1 Angle Measure

Questo programma è stato applicato nell'operazione di piegatura della lamiera e consente di individuare due feature rettilinee nell'immagine e di calcolare l'angolo che queste formano tra di esse in real-time. Consente inoltre di calcolare il fattore di ritorno elastico K come rapporto tra l'angolo di piega finale, cioè l'angolo che si ottiene una volta rimosso il carico, e l'angolo a cui la lamiera era stata piegata, detto angolo di piega iniziale.

Il programma richiede che vengano selezionate due regioni di interesse (ROI) rettangolari in cui si prevede si trovino i bordi della lamiera interessati dall'operazione di piegatura. All'interno di queste ROI, definite in modo interattivo su una finestra esterna, viene eseguita la ricerca dei punti che caratterizzano i bordi della lamiera e da questi viene poi eseguito il fitting per ricavare le feature lineari rappresentative appunto dei due lembi di lamiera interessati dalla piegatura.

Per la realizzazione del programma si è dovuto tenere in considerazione del fatto che si vuole avere la possibilità di aumentare la velocità di acquisizione della telecamera mantenendo però fisso il campo di immagine. In questo modo non vengono variate le porzioni di feature di interesse accessibili nell'immagine.

Per ottenere questo obiettivo si è scelto di dare la possibilità all'utente di ridurre la risoluzione verticale dell'immagine attraverso il comando "Vertical Binning". Questo comando, attraverso un menu a tendina, permette di scegliere uno tra i valori di riduzione (che vanno da 1 ad 8) consentiti dalla telecamera. Il valore scelto viene aggiornato in automatico dal programma per correggere i valori risultanti dall'individuazione delle feature lineari perché si tenga conto della riduzione di scala verticale eseguita nell'immagine. Le variabili in ingresso alla funzione di calcolo dell'angolo consentiranno dunque di ottenere una misura corretta.

Il Front Panel del programma è mostrato nella *Figura 4.23*, qui si possono vedere i controlli e gli indicatori principali. Una parte dei controlli sono contenuti nel menu a schede (tab menu), si citano i controlli principali: "Session In" che permette di selezionare il dispositivo di visione da usare per l'acquisizione delle immagini; "Acquisition Frequency" attraverso cui si imposta la frequenza di acquisizione (quando viene scelto il valore nullo l'acquisizione viene eseguita alla massima velocità consentita dalla telecamera); "Vertical Binning" che permette di impostare il valore di riduzione della risoluzione verticale ed il comando "Stop" che fa terminare il programma. Per quanto riguarda gli

indicatori, invece, si nota il “Display” nel quale vengono visualizzate in real-time le immagini acquisite e le feature lineari individuate; si notano anche gli indicatori numerici che riportano, sempre in real-time, i valori calcolati dell’angolo e del fattore di ritorno elastico K.

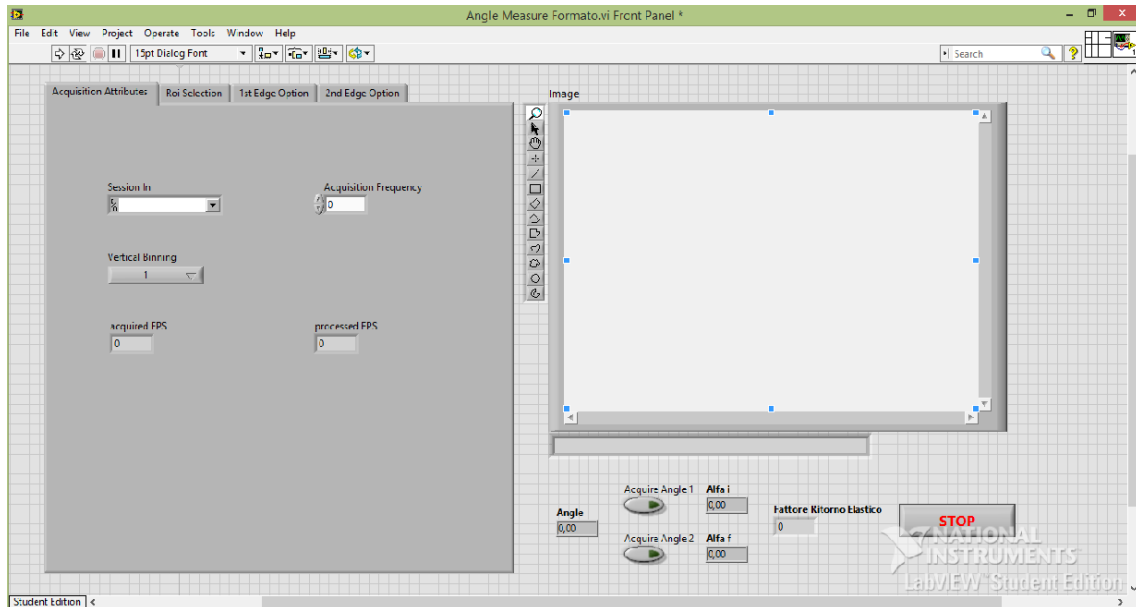


Figura 4.23 Front Panel del programma *Angle Measure*.

Il codice realizzato è strutturato nel modo illustrato dal diagramma di flusso di *Figura 4.24*.

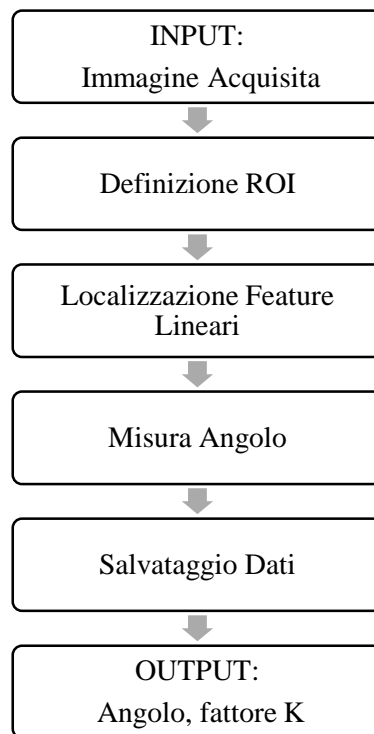


Figura 4.24 Diagramma di flusso del programma *Measure Angle*

Tutto il codice è contenuto in un unico *While Loop*, escluse le inizializzazioni necessarie per l'acquisizione delle immagini e per il salvataggio dei dati e per la chiusura di queste sessioni. Lo svolgimento sequenziale delle funzioni implementate dai sottosistemi sopraelencati avviene per ogni immagine acquisita, dunque l'esecuzione viene ripetuta con un loop infinito fino all'azionamento del comando "Stop".

Le funzioni di inizializzazione effettuate prima del ciclo while (vedi *Figura 4.25*) e le funzioni di chiusura svolte dopo di questo (vedi *Figura 4.26*), nel momento in cui lo si fa terminare attraverso il comando "Stop", sono le seguenti:

- *IMAQdx Open Camera*: apre una connessione con la telecamera selezionata nel Front Panel e carica le impostazioni di acquisizione salvate nella memoria della telecamera stessa.
- *IMAQdx Configure Grab*: permette di salvare nella memoria della telecamera eventuali modifiche apportate ai parametri di acquisizione ed invia un segnale alla telecamera per dare inizio all'acquisizione in continuo.
- *IMAQ Create*: crea uno spazio temporaneo in memoria da poter utilizzare per il salvataggio dell'immagine ad ogni ciclo.
- *Open/Create/Replace File*: accede ad una allocazione di memoria per aprire un file esistente, creare un nuovo file o rimpiazzare un file esistente. Il percorso di allocazione seguito in questo programma viene definito in modo interattivo attraverso una finestra di dialogo che appare nel Front Panel quando si dà il via all'esecuzione del programma.

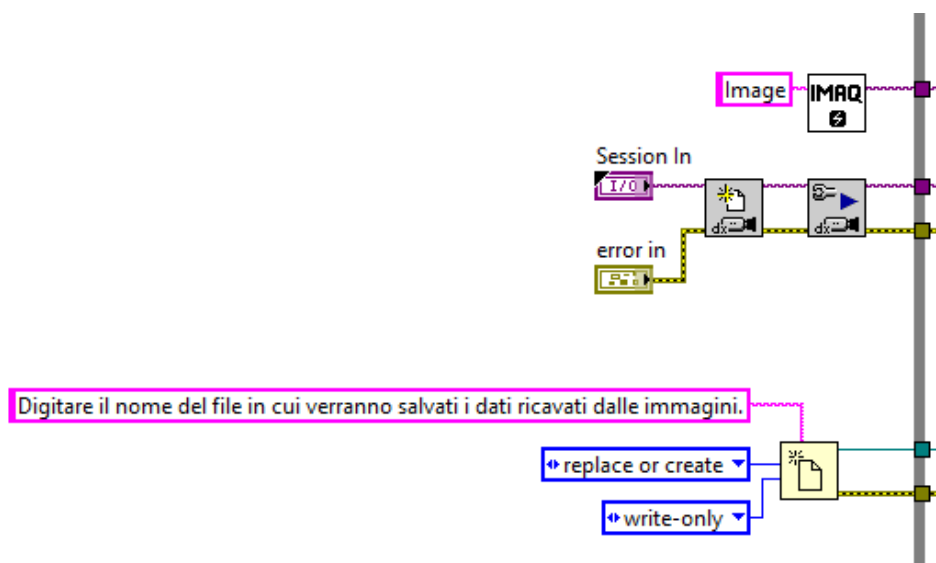


Figura 4.25 Porzione di codice raffigurante le funzioni implementate prima del *While Loop*.

- *IMAQdx Close Camera*: ferma e chiude la sessione di acquisizione di immagini rendendo disponibile la telecamera ad altri programmi.
- *Close File*: chiude il file aperto in precedenza consentendone la modifica da parte di programmi esterni, oltre che la sola lettura.

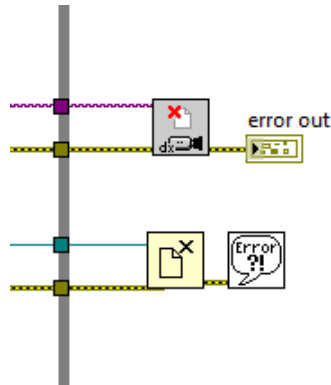


Figura 4.26 Porzione di codice raffigurante le funzioni che vengono implementate una volta terminato il *While Loop*.

Come si nota in *Figura 4.26*, dopo la chiusura delle sessioni si ha, nell'eventualità si sia verificato un errore durante l'esecuzione, la generazione di un messaggio che riporta il codice dell'errore che si è riscontrato.

La parte di codice contenuta nel ciclo while segue, come detto, il diagramma di flusso di *Figura 4.24*, e viene presentata blocco per blocco qui di seguito.

- Definizione ROI

La parte di codice inerente la selezione delle regioni di interesse rettangolari viene scritta utilizzando la struttura *Case*, cioè una struttura contenente due o più sottodiagrammi di codice, detti casi. In essa è visibile solo uno dei sottodiagrammi alla volta e viene eseguito solo un caso alla volta. Un valore di ingresso determina quale caso deve essere eseguito. La struttura *Case* è la corrispondente della struttura *If...Then...Else* dei linguaggi di programmazione testuali.

La determinazione del sottodiagramma da eseguire viene fatta, in questo VI, attraverso un controllo booleano. Quando il controllo viene azionato nel Front Panel viene eseguita la porzione di codice che consente la selezione della ROI in una finestra esterna contenente l'ultima immagine acquisita. Se, invece, non si aziona il controllo viene mantenuta la definizione della regione di interesse che si aveva nel ciclo precedente.

In *Figura 4.27* è illustrata la scheda del Front Panel contenente i comandi per la selezione delle ROI e con gli indicatori che ne visualizzano le caratteristiche.

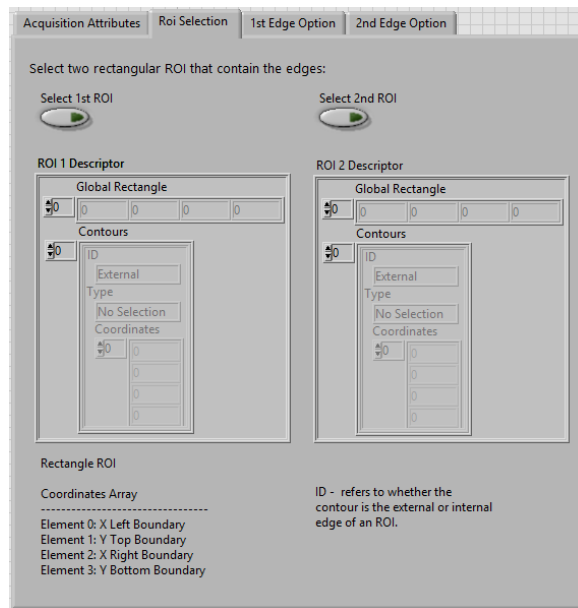


Figura 4.27 Scheda del Front Panel in cui si trovano i controlli booleani per la selezione delle ROI e gli indicatori che visualizzano i parametri della selezione effettuata.

La scelta di utilizzare questa struttura è stata fatta allo scopo di non dovere definire per ogni immagine analizzata le ROI, perdendo di fatto le caratteristiche di real-time del programma. Una volta definite le due regioni di interesse, infatti, queste rimangono costanti per tutte le immagini acquisite fino a che non si riattiva il controllo per la selezione delle ROI per una nuova definizione. Per mantenere una certa flessibilità del programma a variazioni durante l'esecuzione, le due regioni di interesse vengono determinate in strutture *Case* distinte, utilizzando comandi distinti, per lasciare la libertà di poterne modificare anche solo una delle due, vedi *Figura 4.28*.

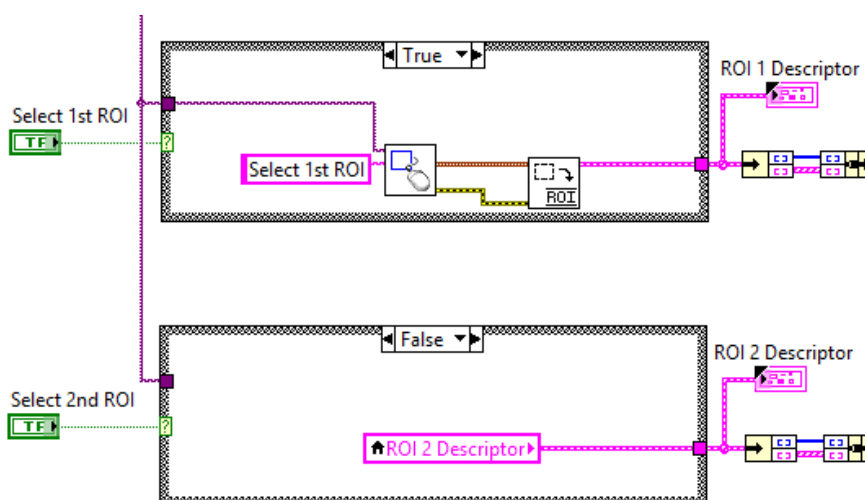


Figura 4.28 Porzione di codice per la definizione delle due ROI. Sopra si vede il sottodiagramma che viene eseguito quando viene azionato il controllo “Select 1st ROI”. Sotto si vede il sottodiagramma che viene eseguito quando il controllo “Select 2nd ROI” non viene azionato. Si noti in questo caso l’utilizzo di una variabile locale per richiamare la definizione del ciclo precedente. Per entrambe le strutture il codice dei sottodiagrammi è analogo.

- Localizzazione Feature Lineari

All'interno delle regioni di interesse definite nello step precedente viene eseguita la ricerca dei punti del bordo del lembo di lamiera in esame. La ricerca viene fatta sfruttando gli algoritmi di Edge Detection presentati. I punti di bordo individuati vengono poi interpolati con una funzione di fitting lineare per ottenere una feature rappresentativa del bordo della lamiera.

Le attività di ricerca e di fitting dei punti trovati vengono implementate in contemporanea dalla funzione *IMAQ Find Edge* che restituisce in output l'equazione della retta interpolatrice calcolata, questa funzione viene applicata in sequenza ad entrambe le ROI determinate, vedi *Figura 4.29*. Inoltre questa funzione consente di visualizzare tale retta sovrapposta all'immagine analizzata nel "Display" del Front Panel. Si possono visualizzare anche le linee di ricerca ed i punti di bordo localizzati. In questo modo si può avere un riscontro visivo che consente di valutare qualitativamente se il programma sta effettivamente individuando il bordo di interesse.

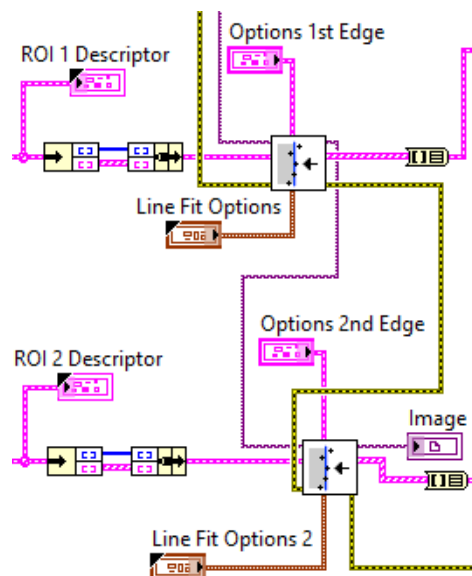


Figura 4.29 Porzione di codice per la localizzazione di feature lineari. Si notino in input ad ognuna delle due funzioni *IMAQ Find Edge* le icone dei controlli per il settaggio delle opzioni di ricerca del bordo e di fitting dei punti trovati. In output della seconda si vede l'indicatore "Image" relativo al Display del Front Panel.

Nel Front Panel sono state riservate due schede del tab menu per il posizionamento dei controlli per il settaggio dei parametri di ricerca e di fitting dei punti del primo e del secondo bordo rispettivamente, come mostrato in *Figura 4.30*. Questi controlli sono stati presentati nel paragrafo inerente all'Edge Detection.

Si noti sulla colonna di destra del riquadro "Options 1st Edge" la possibilità di selezionare gli elementi da visualizzare nel "Display" ed il colore per la loro rappresentazione.

Questa funzionalità di visualizzazione si è rivelata molto utile durante l'esecuzione del programma per l'impostazione delle opzioni di ricerca e fitting dei punti, oltre che per la valutazione della correttezza della feature individuata.

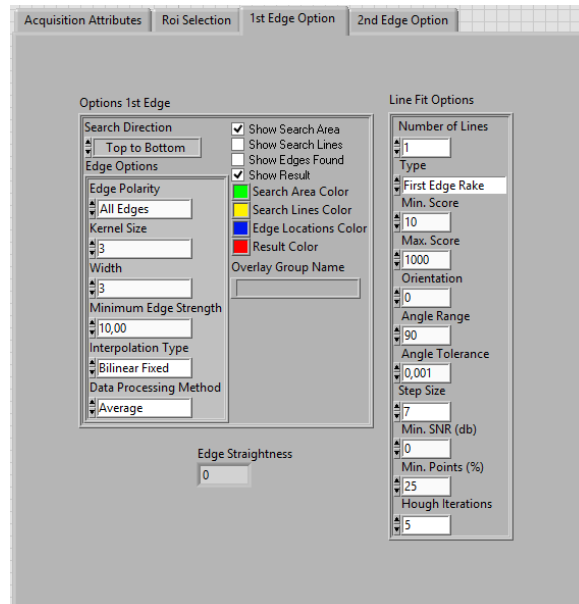


Figura 4.30 Scheda del Front Panel in cui si trovano i controlli per impostare i parametri di ricerca e di fitting dei punti del bordo della lamiera.

- Misura Angolo

Questa parte di codice è stata realizzata sfruttando la funzione *IMAQ Lines Intersection* che calcola il punto di intersezione e l'angolo tra due feature lineari. Questa funzione richiede in input l'equazione rappresentativa di due rette definite ognuna attraverso le coordinate dei loro punti iniziale e finale. Per fornire i dati corretti in input a questa funzione è necessario dunque, come detto sopra, eseguire una correzione delle coordinate verticali dei punti ricavati nello step precedente in modo da tenere in considerazione di una eventuale variazione di scala in direzione verticale.

La correzione viene fatta sfruttando le "Locale Variable" di lettura, cioè delle funzioni che richiamano un valore determinato o tramite un controllo, come nel presente caso, o ricevuto in output da una funzione. L'utilizzo di questa soluzione permette al programma di adattarsi a qualsiasi valore di binning verticale stabilito e di eseguire in automatico la correzione necessaria a non eseguire calcoli errati a causa del cambio di risoluzione in direzione verticale.

La funzione *IMAQ Lines Intersection* e le correzioni eseguite son raffigurate in *Figura 4.31*.

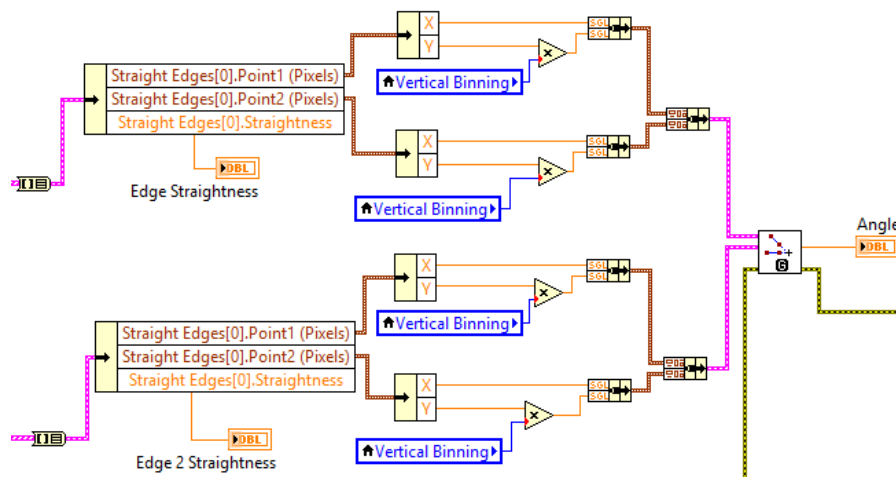


Figura 4.31 Porzione di codice raffigurante la correzione di coordinate eseguita e la misura dell'angolo tra le feature lineari.

- Salvataggio Dati

Anche in questo caso è stata utilizzata la struttura *Case* comandata da un controllo booleano chiamato "Save Data". In questo caso una volta azionato il controllo questo rimane attivato finché non viene cliccato una seconda volta. Attraverso questo controllo si ha la possibilità, durante l'esecuzione del programma, di avviare ed arrestare il salvataggio, su un file di testo, di tutti i valori dell'angolo misurati istante per istante e per ognuno di essi salvare il riferimento temporale della misura.

La precisione raggiunta da questo programma nella misura dell'angolo e in quella del fattore di ritorno elastico K durante l'operazione di piegatura dipende principalmente dalla rappresentatività delle feature lineari individuate dalle funzioni. Queste a loro volta dipendono in primis dalle zone accessibili di lamiera scelte per la loro localizzazione e dai parametri di ricerca e di fitting impostati. Questi devono essere stabiliti in modo accurato tenendo conto delle condizioni di illuminazione, variabili durante l'esecuzione, e del contrasto dell'immagine.

4.3.2 Find Marker

Questo programma consente di cercare in real-time una geometria di modello, chiamata *Template*, all'interno delle immagini acquisite tramite la telecamera. In caso di matching il programma restituisce la posizione e l'orientamento della feature, la scala ed un punteggio che quantifica la qualità della corrispondenza con il modello per ogni riscontro rilevato.

Prima di eseguire il programma è necessario definire la geometria del modello attraverso il software *NI Vision Template Editor*.

Il programma è stato utilizzato per la localizzazione di marker apposti sugli stampi di una pressa a vite nell'operazione di forgiatura a freddo.

Il Front Panel del programma è mostrato in *Figura 4.32*. I principali controlli di questo programma sono di tipo booleano: “Load Template” permette di caricare l'immagine della geometria di modello; “Search” serve per avviare ed arrestare la ricerca del modello nelle immagini acquisite dalla telecamera e “Stop” per terminare l'esecuzione del programma. Gli altri controlli riguardano l'impostazione dei parametri necessari all'operazione di learning del modello e a quella di matching nell'immagine. Per quanto concerne gli indicatori si può vedere un display più grande, chiamato “Image”, nel quale vengono visualizzate in real-time le immagini acquisite ed in caso di matching viene visualizzato anche un riquadro attorno alla feature localizzata. Nel display più piccolo, chiamato “Template”, viene mostrata l'immagine della geometria del modello. Si vede poi una tabella dei risultati nella quale vengono elencati gli eventuali riscontri del matching con le relative informazioni di localizzazione.

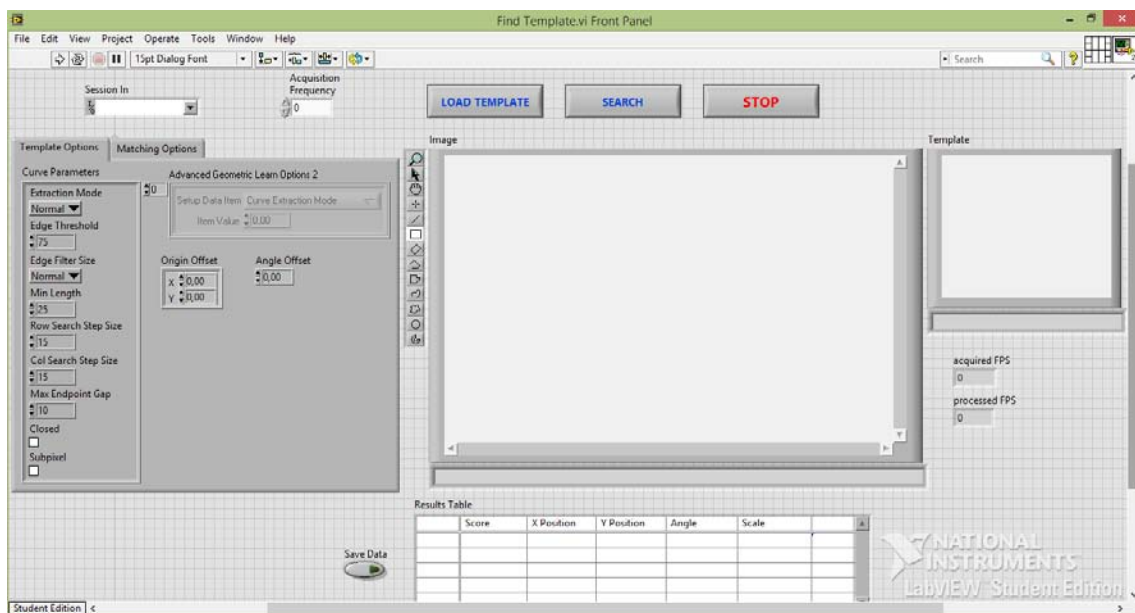


Figura 4.32 Front Panel del programma *Find Template*.

Il codice del programma è strutturato secondo quanto illustrato nel diagramma di flusso di *Figura 4.33*.

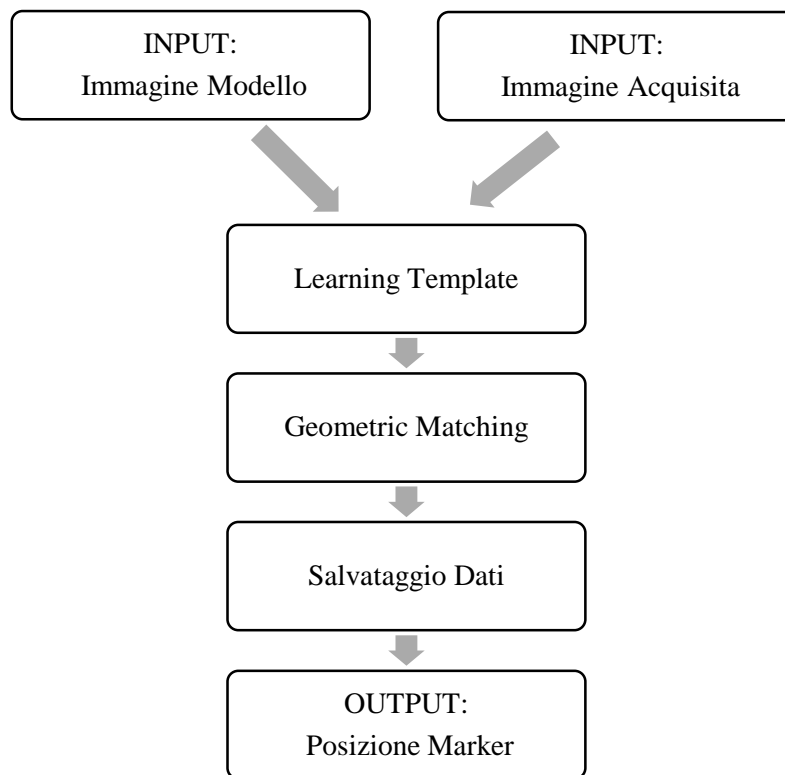


Figura 4.33 Diagramma di flusso del programma *Find Template*.

Anche in questo caso il codice è contenuto in un unico *While Loop*, escluse le varie inizializzazioni e chiusure delle sessioni. In questo caso, oltre la creazione di uno spazio temporaneo nella memoria per il salvataggio delle immagini acquisite, se ne crea anche uno per l'immagine del modello con allegate le relative informazioni che verranno utilizzate nel programma. Al termine del ciclo while questi spazi di memoria vengono liberati per poi procedere con il termine dell'esecuzione del programma. Prima del ciclo while vengono inoltre inizializzati i valori nella tabella dei risultati azzerandoli.

Questo programma è più complesso del precedente, ne consegue una maggiore pesantezza per il calcolatore ed una minore velocità di elaborazione.

In questo programma è stata sfruttata la struttura *Stacked Sequence*, cioè una struttura contenente uno o più sottodiagrammi, detti frame, che vanno in esecuzione sequenzialmente con un ordine forzato solo quando è terminata l'esecuzione del frame precedente.

Questo ha permesso di alleggerire il compito del calcolatore in quanto il programma è stato suddiviso in tre parti che vengono considerate una alla volta. Nella prima parte sono state eseguite le varie inizializzazioni, la seconda sezione contiene la parte di codice di elaborazione delle immagini acquisite (strutturata secondo il diagramma di flusso presentato sopra). Nella terza parte ci sono le chiusure delle sessioni.

Come nel programma precedente, la parte di codice presentata dal diagramma di flusso viene eseguita sequenzialmente con un loop infinito fino all'azionamento del controllo "Stop".

Si procede ora alla descrizione dei vari blocchi funzionali.

- Learning Template

Questa parte di codice è scritta utilizzando la struttura *Case* comandata dal controllo booleano "Load Template". Quando questo viene azionato si apre una finestra di dialogo che consente di scegliere il percorso per accedere ed aprire l'immagine del modello. Una volta caricato il file dell'immagine vengono lette le informazioni ad esso allegate (definite mediante il software *NI Vision Template Editor*) e viene creata una descrizione della geometria del modello attraverso la funzione *IMAQ Learn Geometric Pattern 2*.

L'utilizzo della struttura *Case* consente di mantenere le informazioni sulla geometria del modello caricato, passandola da un ciclo a quello successivo, fino a quando non viene azionato nuovamente il controllo "Load Template".

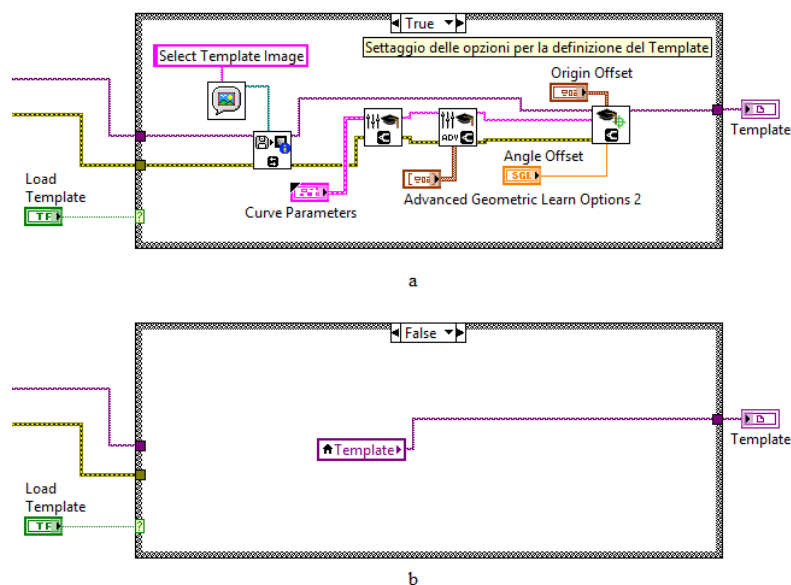


Figura 4.34 Porzione di codice riguardante il Learning Template. Sottodiagramma eseguito quando il controllo "Load Template" restituisce il valore booleano "True", nell'immagine (a), oppure "false", nell'immagine (b).

Come si può notare dalla *Figura 4.34-a*, la fase di apprendimento della geometria del modello dipende dai parametri che vengono impostati per la ricerca e la localizzazione delle feature nell'immagine campione. Questi parametri possono essere settati nel Front Panel attraverso i controlli ad essi dedicati, contenuti nel tab menu raffigurato a sinistra del display "Image" in *Figura 4.32*.

- Geometric Matching

Anche questa porzione di programma utilizza la struttura *Case*. Questa viene comandata attraverso il controllo “Search”. Quando questo viene cliccato restituisce il valore “True” finché non viene premuto una seconda volta e commutare su “False”. L’attivazione comporta l’esecuzione del sottodiagramma che esegue la ricerca nelle immagini acquisite della geometria del modello e restituisce le varie informazioni del matching. Queste operazioni vengono implementate dalla funzione *IMAQ Match Geometric Pattern 2* che, oltre all’immagine acquisita, richiede in input le informazioni della geometria del modello definite nello step precedente. Una volta eseguito il matching viene implementata una funzione che permette di visualizzare sul display “Image” un riquadro attorno ad ogni riscontro rilevato. Questa funzione risulta essere molto utile in quanto permette all’utente di individuare subito nell’immagine visualizzata le posizioni della feature cercata. I dati ricavati dal matching vengono poi elaborati attraverso una struttura *For Loop* per costruire la tabella dei risultati in cui questi vengono visualizzati in modo chiaro ed intuitivo, vedi *Figura 4.35*. Quando il comando “Search” restituisce il valore “False” non viene eseguita nessuna operazione di matching e la tabella dei risultati appare vuota.

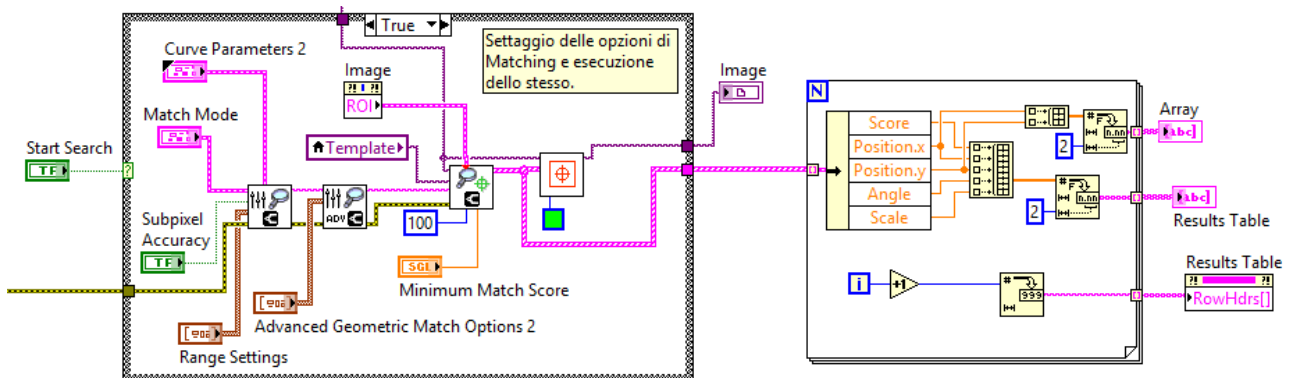


Figura 4.35 Porzione di codice che raffigura a sinistra la parte di Geometric Matching e a destra la costruzione della tabella dei risultati con le informazioni ricavate.

I risultati ottenuti nella fase di matching sono strettamente legati alle impostazioni dei parametri di ricerca. Questi possono essere settati nel programma attraverso i controlli contenuti nell’apposita scheda del tab menu contenuto nel Front Panel, vedi *Figura 4.36*.

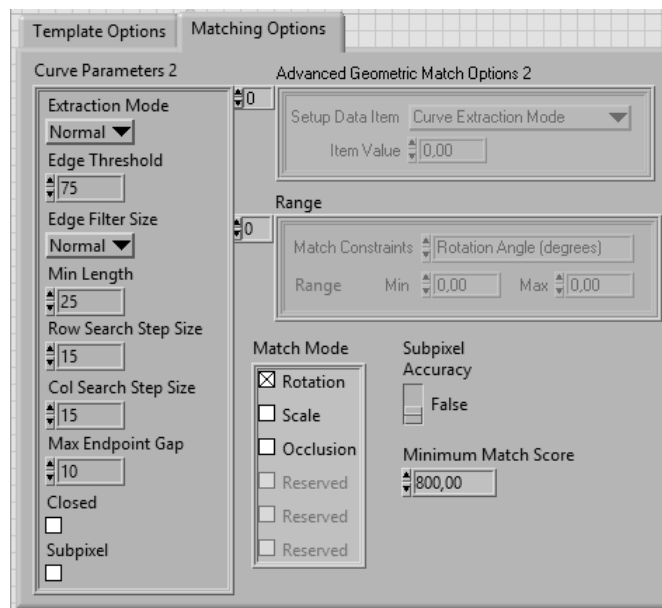


Figura 4.36 Scheda del Front Panel in cui si possono impostare i parametri per il matching. Si notino in particolare i comandi che consentono di comprendere tra i risultati anche le feature in scala o solo parzialmente accessibili nell'immagine.

- Salvataggio Dati

Questa parte di programma consente, attraverso il controllo "Save Data", di avviare ed arrestare il salvataggio dei dati su un file di testo durante l'esecuzione del programma. Per ogni immagine analizzata viene dunque salvato un riferimento temporale, un codice alfanumerico che identifica l'immagine elaborata e le coordinate delle posizioni delle feature che corrispondono al modello cercato nell'immagine stessa.

La precisione nella localizzazione delle feature geometriche cercate dipende sia dai valori impostati dall'utente per la definizione della geometri del modello, sia da quelli impostati per la ricerca. La precisione può, inoltre, andare oltre la risoluzione dell'immagine quando vengono utilizzate tecniche subpixel. Anche in questo caso i valori devono essere scelti in modo accurato tenendo in considerazione anche i fattori esterni, primo su tutti le condizioni di illuminazione.

4.3.3 Contour Extraction

Il programma localizza ed estrae, in real-time, i punti del contorno dell'oggetto inquadrato nelle immagini acquisite con la telecamera. È possibile restringere il campo di analisi all'interno di una ROI definita in modo interattivo dall'utente direttamente sul display nel Front Panel.

La possibilità di ricostruzione del contorno dell'oggetto inquadrato è stata sfruttata, in questo lavoro, per la misura degli angoli di piega e del fattore di ritorno elastico K nel caso di profili a doppia curvatura. Questo può essere applicato anche al caso di piegatura di profili a singola curvatura.

In ogni caso, sono possibili anche altre valutazioni geometriche, come ad esempio il raggio di piega o lo spessore locale in alcuni punti della lamiera.

Il programma consente inoltre di visualizzare i punti del contorno rilevati direttamente sul display del Front Panel sovrapposti all'immagine da cui sono stati estratti.

I criteri con cui vengono localizzati ed estratti i punti si basano sugli algoritmi di Edge Detection presentati. L'accuratezza nella riproduzione del contorno è legata anche in questo caso alle scelte eseguite dall'utente per l'impostazione dei parametri di ricerca dei punti del bordo.

Il programma è stato suddiviso in tre parti che vanno in esecuzione secondo la sequenza forzata dalla struttura *Stacked Sequence*. Nella prima sezione ci sono le inizializzazioni per l'acquisizione di immagini, per il salvataggio delle stesse e per il salvataggio dei punti del contorno su un file di testo. Nella seconda parte è presente una struttura *While Loop* contenente la porzione di codice di analisi delle immagini. Infine, nella terza parte vengono fatte le chiusure delle varie sessioni.

Il Front Panel del programma è mostrato in *Figura 4.37*.

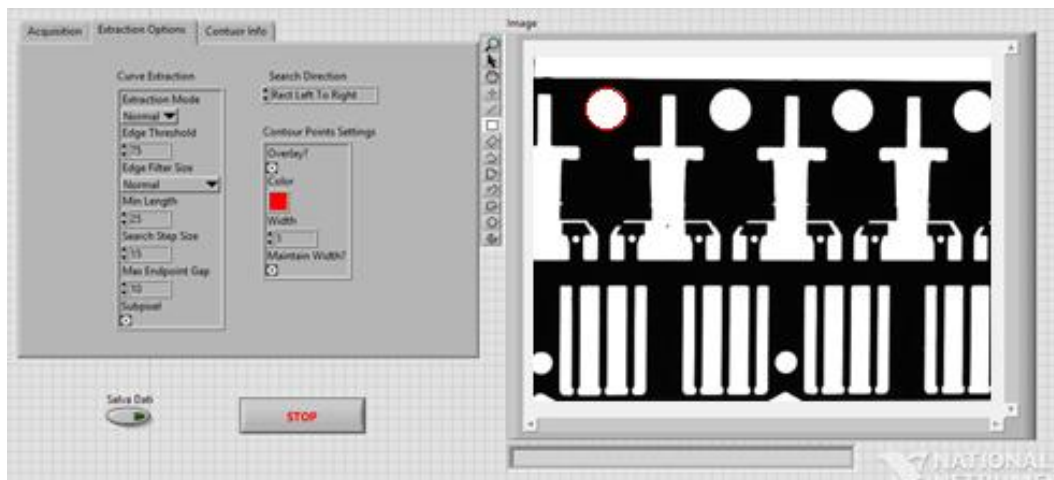


Figura 4.37 Front panel del programma *Contour Extraction*.

Ogni immagine acquisita viene elaborata seguendo il diagramma a flusso mostrato in *Figura 4.38*.

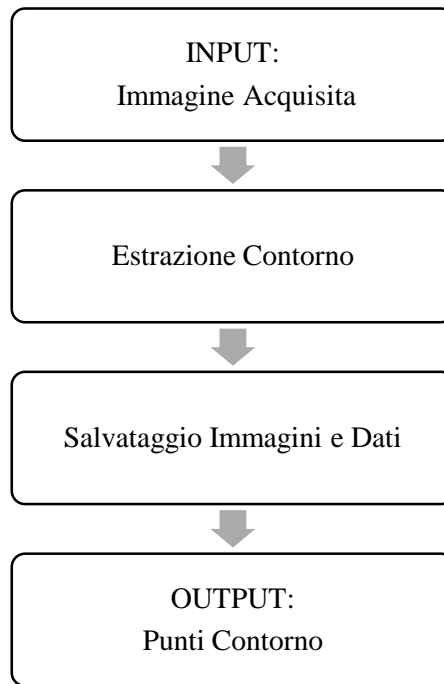


Figura 4.38 Diagramma a flusso del programma *Contour Extraction*.

- Estrazione Contorno

In questa porzione di codice viene fatta l'estrazione dei punti del contorno, la visualizzazione del contorno ricavato sovrapposta all'immagine nel display e la costruzione della tabella dei risultati, posizionata nel Front Panel, contenente le coordinate dei punti del contorno.

La localizzazione dei punti viene fatta applicando la funzione *IMAQ Extract Contour* sulle immagini acquisite dalla telecamera. Per alleggerire la pesantezza dell'elaborazione si ha la possibilità di restringere il campo di ricerca andando a definire, in modo interattivo direttamente dal display, la regione di interesse all'interno della quale applicare la funzione.

Con la funzione *IMAQ Overlay Contour* si va invece a sovrapporre il contorno dell'oggetto individuato nell'immagine all'immagine stessa nel display.

Per costruire la tabella dei risultati si è invece sfruttata la struttura *For Loop* per andare ad inserire sulle righe il numero che identifica il punto rilevato, e sulle colonne le coordinate dei rispettivi punti. La porzione di codice che esegue queste funzioni è mostrata in *Figura 4.39*.

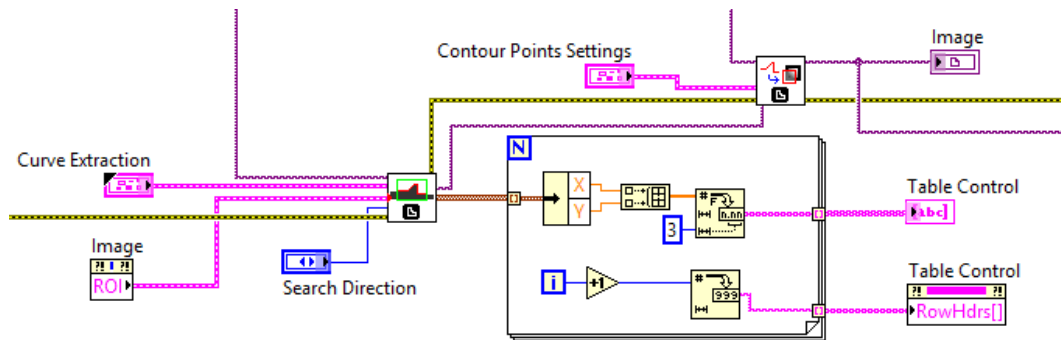


Figura 4.39 Porzione di codice per l'estrazione dei punti del contorno.

- Salvataggio Immagini e Dati

Questa parte di programma consente, attraverso il controllo "Save Data", di avviare ed arrestare il salvataggio delle immagini acquisite dalla telecamera e dei punti del contorno su un file di testo durante l'esecuzione del programma. L'utente ha la possibilità di specificare, all'avvio dell'esecuzione del programma, il percorso della cartella in cui verranno salvate le immagini ed il nome del file di testo contenente i dati. Il file dei dati è strutturato per salvare, oltre alla tabella dei risultati contenente i punti del contorno dell'oggetto, un'etichetta che consente di conoscere a quale immagine si riferiscono i punti.

In Figura 4.40 è illustrato come è stato realizzato questo blocco funzionale di codice.

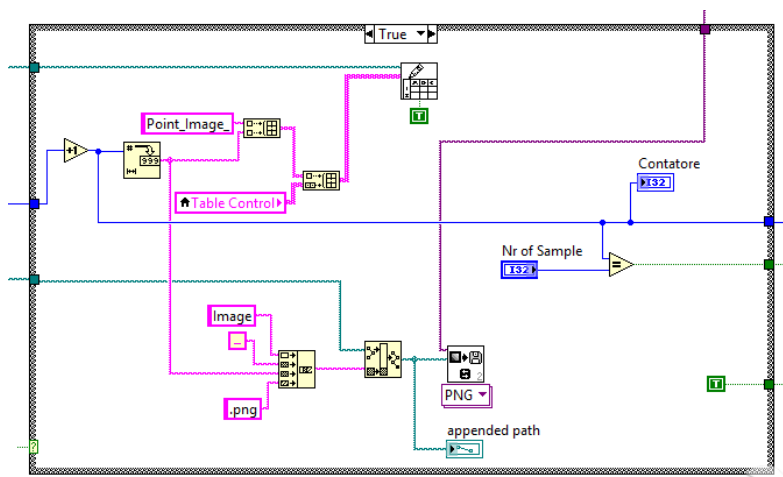


Figura 4.40 Porzione di codice per il salvataggio delle immagini e dei dati.

4.4 Set-up Hardware e Software

La gestione di tutti e software e gli hardware *National Instruments* viene eseguita tramite il *Measurement & Automation Explorer*, detto MAX. Questa applicazione è inclusa nei pacchetti driver di NI e non è scaricabile singolarmente.

La piattaforma MAX consente di:

- Configurare i software e gli hardware NI.
- Visualizzare i dispositivi e gli strumenti collegati al sistema.
- Creare e modificare i canali, le interfacce, i task degli strumenti reali e virtuali.
- Eseguire la diagnostica del sistema e dei test di funzionamento.
- Eseguire l'update dei software installati sul calcolatore.

Si può accedere a MAX in due modi: cliccando direttamente sull'icona nel desktop o selezionando "Tool» Measurement & Automation Explorer".

Attraverso il menu con struttura ad albero posto sulla sinistra della finestra del MAX si ha la possibilità di accedere alla lista di tutti gli hardware NI, tutte le periferiche hardware ed i software compatibili che sono collegati al sistema. Questi sono elencati nelle sezione "Devices and Interfaces" all'interno di "My System".

Da questa sezione si può accedere alla finestra di gestione dei parametri di acquisizione e di quelli intrinseci della telecamera.

In questo lavoro si è utilizzata la telecamera *AVT Prosilica GT 1660* per la quale il trasferimento dei dati si basa sul protocollo GigE Vision [24].

Le telecamere di questa tipologia sono elencate, sempre nella struttura ad albero dei dispositivi collegati all'Host, all'interno della cartella "NI-IMAQdx".

Per rendere possibile l'utilizzazione di LabVIEW per l'acquisizione di immagini è stato necessario innanzitutto provvedere ad installare correttamente tutto l'hardware e il software necessari. Per quanto riguarda l'hardware è necessario avere a disposizione una porta Gigabit Ethernet che permetta di acquisire immagini con Ethernet (10 MB/s) e Fast Ethernet (100 MB/s) da dispositivi GigE Vision. Dal punto di vista software bisogna avere installato il modulo NI Vision che permette di utilizzare LabVIEW per acquisire immagini da telecamere GigE Vision. Inoltre devono essere installati i driver *Allied Vision Technologies* relativi alla telecamera in questione.

A questo punto si è reso necessario configurare la rete.

La telecamera GigE Vision può ottenere un indirizzo IP da un server DHCP oppure è possibile assegnargliene uno utilizzando Link Local Addressing (LLA).

In questo caso dopo aver collegato la telecamera al PC mediante la porta Gigabit Ethernet, è stato assegnato l'indirizzo IP alla telecamera utilizzando il software *GigE Sample Viewer* attraverso la funzione *cofigip*. Sono stati assegnati i seguenti valori:

Indirizzo IP: 10.157.4.70

Subnet Mask: 255.255.248.0

Server DNS: 10.157.0.2

Server DHCP: 10.157.7.254

Tipicamente il driver di rete divide tutti i dati più grandi di 1500 byte in più pacchetti. Tuttavia, lo standard GigE Vision permette di trasferire pacchetti di dati di dimensioni fino a 9014 byte. Questi pacchetti di grandi dimensioni, chiamati pacchetti Jumbo, disattivano momentaneamente la telecamera per trasferire in modo più efficiente i dati verso la rete.

È necessario configurare le impostazioni di rete del PC perché sia in grado di ricevere i pacchetti di dati di tipo Jumbo. Per fare questo è stato necessario accedere alla finestra "Gestione dispositivi" tramite il "Pannello di controllo" di *Windows*. A questo punto si è aperta la sezione delle schede di rete e cliccando con il tasto destro sull'icona della scheda di rete principale del PC è stata aperta la relativa finestra delle proprietà. All'interno della scheda "Avanzate" è stato impostato il valore "MTU 9KB" per la proprietà "Frame jumbo".

Quando la telecamera acquisisce le immagini vi è un immediato flusso di pacchetti di dati verso l'Host. Il traffico di dati in entrata nell'Host viene però bloccato nel caso sia attivo il firewall di rete. Pertanto è stato necessario disabilitare il "Windows Firewall" dal "Pannello di controllo" per riuscire ad acquisire immagini con la telecamera [25].

Attraverso il MAX è possibile verificare rapidamente se la telecamera è collegata correttamente. In questo caso, infatti, la telecamera appare elencata all'interno della cartella dei dispositivi "NI-IMAQdx" e tramite il comando "Snap" o il comando "Grab" si è in grado di verificare se si ha il trasferimento di dati tra telecamera e Host. In caso contrario sul MAX appare una finestra che mostra il codice dell'errore che si è verificato. Tramite il supporto online di *National Instruments* si può poi risalire alla causa dell'errore.

Completate queste operazioni è stato possibile eseguire il settaggio dei più importanti parametri di acquisizione, tra cui il formato dell'immagine, il frame rate, il tempo di esposizione, il binning ed altri ancora. Quelli appena citati sono i parametri che sono stati modificati più volte durante l'esecuzione dei programmi creati al fine di testare ed ottimizzare le prestazioni del sistema di visione nelle varie applicazioni studiate.

Le altre impostazioni utilizzate per la telecamera, che però non sono state fatte variare durante il lavoro, sono presentate nelle *Tabelle 4.1, 4.2 e 4.3* alla fine del paragrafo.

I valori assegnati ai vari parametri utilizzando il MAX vengono registrati in file XML e rimangono validi in tutti gli utilizzi della telecamera finché non vengono reimpostati dall'utente.

I moduli NI-IMAQdx forniscono i metodi per modificare il valore di qualsiasi attributo presente nel file XML. Ogni attributo supportato dalla telecamera viene, infatti, definito dalle seguenti proprietà: nome dell'attributo, rappresentazione (Integer, Float, Boolean, String o Enumeration), unità di misura e tipo di accesso (sola lettura, sola scrittura o lettura/scrittura). In LabVIEW è possibile impostare il valore di un attributo utilizzando un "Property Node".

Gli attributi impostabili permettono alla telecamera di essere sufficientemente flessibile per operare in contesti diversi con vincoli diversi.

La finestra del MAX in cui si possono modificare gli attributi di acquisizione e quelli della telecamera è mostrata in *Figura 4.41*.

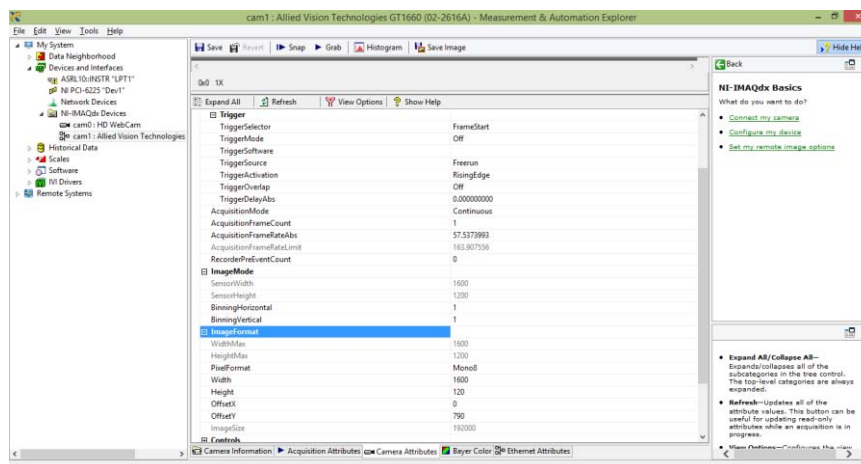


Figura 4.41 Finestra del MAX in cui vengono settati gli attributi della telecamera.

Nel MAX gli attributi vengono raggruppati in tre categorie, i valori assegnati alle impostazioni principali sono i seguenti:

1. Acquisition Attributes:

Tabella 4.1 Acquisition Attributes, AVT Prosilica GT 1660.

Pixel Format	Mono8
Packet Size	8228 bytes
Receive Timestamp Mode	System Time
Timeout	10000 ms

2. Camera Attributes:

Tabella 4.2 Camera Attributes, AVT Prosilica GT 1660.

Resend Parameters	
MaxResendsPerPacket	25
MemoryWindowSize	1024
MissingPacketTimeout	10
NewPacketTimeout	10
ResendBatchingPercentage	10
ResendResponseTimeout	2
ResendThresholdPercentage	5
ResendTimerResolution	1
ResendEnabled	Disabled
TestPacketParameters	
MaxTestPacketRetries	0
TestPacketEnabled	Disabled
TestPacketTimeout	25
GigE	
StreamBytesPerSecond	115000000
BandwidthControlMode	StreamBytesPerSecond
PTP	
ChunkModeActive	Disabled
StreamFrameRateConstrain	Disabled
Exposure	
ExposureMode	Timed
ExposureAuto	Off
Trigger	
Trigger Selector	Frame Start
Trigger Mode	Off
Trigger Source	FreeRun

Trigger Activation	RisingEdge
Trigger Overlap	Off
Trigger Delay Abs.	0
Acquisition	
Acquisition Mode	Continuous
Acquisition Frame Count	1
Recorder Pre Event Count	0

3. Ethernet Attributes:

Tabella 4.3 Ethernet Attributes, AVT Prosilica GT 1660.

Resend Enabled	Disabled
Max Resend Per Packet	25
Memory Window Size (KB)	1024
Resend Threshold Percentage	5
Missing Packet Timeout (ms)	10
New Packet Timeout (ms)	10
Resend Response Timeout (ms)	2
Resend Timer Resolution (ms)	1

CAPITOLO 5

Attività sperimentale

5.1 Misura dell'angolo di piega e del fattore di ritorno elastico nella piegatura della lamiera

In questa parte della tesi viene esposta la descrizione dell'applicazione del sistema di visione per la misura in real-time dell'angolo di piega ed il calcolo del fattore di ritorno elastico K . Verranno presentati l'ambiente di prova, la configurazione di piega analizzata e le soluzioni proposte per il raggiungimento dell'obiettivo. Inoltre, verranno descritti dettagliatamente il set-up del sistema di piega e di quello visione e i test effettuati per la determinazione delle caratteristiche del sistema di misura messo a punto.

La procedura seguita in questa parte ha visto dapprima il set-up del sistema di piega considerato, cioè quello del "V-bending", e la sua analisi per la definizione dei vincoli progettuali presenti. A questo punto è stata perfezionata la prima bozza del programma "Angle Measure" in ambiente LabVIEW per arrivare alla versione definitiva. In contemporanea è stata studiata anche la soluzione per ottenere l'incremento del frame rate del telecamera che fosse congruente ai vincoli progettuali del sistema.

Finita questa prima parte è stato realizzato il set-up del sistema di visione con il posizionamento e l'allineamento della telecamera e del sistema di illuminazione.

Successivamente sono state studiate le principali fonti di errore che influenzano il sistema per la progettazione della procedura di prova da seguire nella determinazione delle caratteristiche del sistema di misura. Questo ha consentito dunque anche la quantificazione dell'incertezza di misura sull'angolo di piega.

A questo punto è stata eseguita prima di tutto la calibrazione dell'immagine per poi passare alla campagna di prova pianificata per la taratura del sistema di misura ed infine è stata realizzata un'altra campagna di prova per la valutazione delle prestazioni del sistema nel calcolo del fattore di ritorno elastico.

5.1.1 Ambiente di prova: macchina di carico universale MTS

Le prove di piegatura sono state realizzate utilizzando la macchina di carico universale di tipo idraulico modello MTS 322 mostrata in *Tabella 5.1*. Questa macchina consente di effettuare molteplici prove di laboratorio quali, ad esempio, prove di trazione, prove di compressione, prove di fatica e tramite un'appropriata configurazione di utensili anche prove di piegatura. Grazie al sistema di controllo in dotazione alla MTS 322 è possibile comandare la macchina sia in controllo di carico che in controllo di spostamento con la possibilità di acquisire i relativi dati con una frequenza impostabile fino ad un massimo di 2014 Hz.

La principale caratteristica di questa macchina, dal punto di vista del sistema di misura messo a punto, è data dal fatto che la parte mobile è costituita dalla testa e dal pistone inferiore, mentre la testa superiore rimane fissa durante la prova.

Vengono in *Tabella 5.1* riportati i dati di targa della macchina di carico in questione:



Figura 5.1 Macchina di carico universale MTS 322

Tabella 5.1 Dati di targa MTS 322

Capacità di carico	100 kN
Massa totale	1370 kg
Altezza massima tra le ganasce	1270 mm
Distanza tra le colonne	533 mm
Profondità della tavola	1000 mm

5.1.2 Set-up del sistema di misura

Una volta montata sulla MTS l'attrezzatura per la realizzazione della piegatura su tre punti, mostrata in *Figura 5.2*, è stata eseguita la rilevazione delle dimensioni degli utensili per andare poi a definire il campo visivo che dovrà essere inquadrato dalla telecamera.



Figura 5.2 Attrezzatura per il V-bending sulla MTS.

Questa scelta è innanzitutto influenzata dai criteri di funzionamento del programma “Angle Measure”, che prevede che debbano essere definite due regioni di interesse all'interno dell'immagine nelle quali eseguire la ricerca delle feature lineari corrispondenti ai lembi di lamiera ai due lati della piega. È quindi necessario che il campo visivo comprenda due tratti lineari di lamiera, adiacenti alla zona in cui la piega causerà la curvatura del profilo, di dimensione sufficiente a garantire una idonea rappresentatività geometrica del tratto di lamiera stesso. Infatti, se questi tratti fossero troppo corti, le feature lineari che vengono definite sono ognuna il risultato dell'interpolazione di un numero ridotto di punti e dunque scarsamente rappresentative del reale profilo della lamiera. Si pensi, ad esempio, alla presenza di una irregolarità all'interno di uno dei tratti considerati, più corta è la sua lunghezza e più l'interpolazione che viene eseguita sarà deviata dal reale profilo della lamiera. Questo creerà un errore nella determinazione delle feature lineari e di conseguenza un errore nella misura dell'angolo di piega.

La definizione della dimensione orizzontale del campo visivo deve tenere quindi in considerazione di questo vincolo.

Altro fattore da tenere in considerazione è che non è il punzone a muoversi in direzione della matrice ma è il viceversa. Questo dipende dal fatto che il punzone viene montato sulla ganascia della testa

superiore della MTS e quindi rimane in posizione fissa durante la lavorazione. La matrice, invece, viene montata sulla ganascia della testa inferiore e quindi sarà questa a spingere la lamiera a piegarsi attorno alla punta del punzone. Dal punto di vista del processo di piegatura questo non è un fattore rilevante, ma lo è per la definizione della dimensione verticale del campo visivo.

La condizione in cui la lamiera è in procinto di entrare in contatto col punzone dovrà quindi essere inquadrata nella parte inferiore dell'immagine in modo che tutta l'operazione di piegatura rientri nel campo d'immagine. Il valore della dimensione verticale dipende quindi dall'angolo massimo di piegatura che viene realizzato per fare in modo di soddisfare le condizioni sopraesposte.

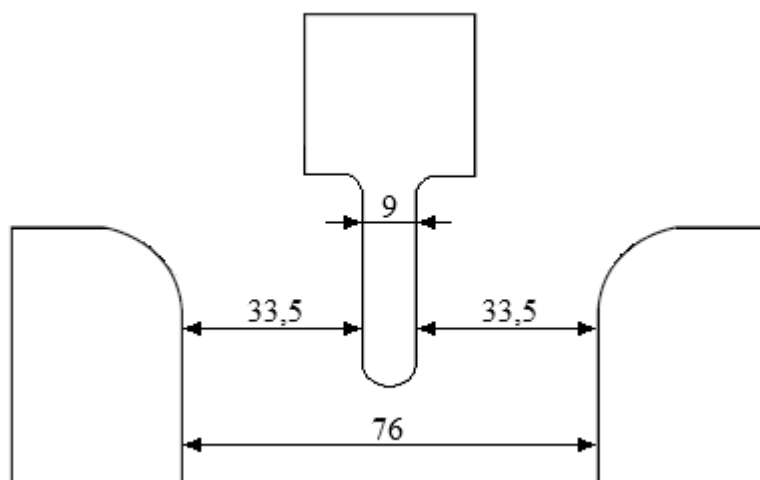


Figura 5.3 Sketch delle dimensioni dell'attrezzatura di piega.

Considerate le misure dell'attrezzatura, illustrate schematicamente in *Figura 5.3*, ed i vincoli progettuali, per il campo di misura è stato scelto per la dimensione verticale il valore minimo di 100 mm, di conseguenza la dimensione del campo visivo risulta essere di 133x100 mm circa. Questa risulta compatibile con il controllo del processo con piegature della lamiera nel range $0^\circ \div 90^\circ$.

A questo punto è stato affrontato il problema del frame rate che, come esposto nel capitolo 3, è stato incrementato sfruttando la funzione di binning verticale. Questa ha permesso di aumentare la frequenza di acquisizione della telecamera senza ridurre il campo visivo.

Per non ridurre troppo la risoluzione dell'immagine si è scelto di testare il sistema di misura in due modalità: la prima a piena risoluzione dell'immagine, cioè con formato d'immagine 1600x1200 e binning verticale pari a 1, e la seconda con risoluzione verticale dell'immagine dimezzata, formato d'immagine 1600x600 e con valore di binning verticale pari a 2.

I parametri principali di acquisizione nelle due modalità esaminate sono riportati in *Tabella 5.2*.

Il metodo con cui è stata calcolata la risoluzione media nelle due direzioni verrà esposto dettagliatamente più avanti. Si noti intanto che come conseguenza dell'impostazione del binning è variato solo il valore della risoluzione verticale, che è peggiorata, mentre quella orizzontale è rimasta invariata.

Tabella 5.2 Confronto tra i principali parametri di acquisizione delle due modalità esaminate.

	Formato 1600x1200 (binning verticale = 1)	Formato 1600x600 (binning verticale = 2)
Frame Rate [fps]	62,0001240	121,065375
Distanza di lavoro [mm]	800	800
Campo visivo [mm]	133,68x100,18	133,76x100,26
Risoluzione Orizzontale [μm]	83,55	83,60
Risoluzione Verticale [μm]	83,48	167,10

Per quanto riguarda l'illuminazione questa è stata realizzata tramite una lampada ad incandescenza rivolta verso l'attrezzatura di piega.

Sullo sfondo è stato posizionato un pannello di colore bianco allo scopo di rendere uniforme il background nell'immagine e in modo da avere meno variazioni possibili tra immagini successive. Questo consente di alleggerire il compito del calcolatore sia per l'equalizzazione dell'immagine che per l'esecuzione degli algoritmi di analisi di immagine presenti nel codice di "Angle Measure".

Un altro accorgimento preso è stato quello di verniciare il profilo della lamiera con vernice nera in modo da aumentare il contrasto con lo sfondo dell'immagine e rendere più nitido il bordo per la ricerca dei punti del bordo della lamiera ed al contempo per evitare che la superficie lucida dei lamierini in alluminio rifletta troppa luce rendendo sfocato il bordo nell'immagine.

Il posizionamento della telecamera è stato eseguito tramite un cavalletto posto di fronte alla MTS. La telecamera è stata innanzitutto allineata alla direzione longitudinale della piega. Per fare questo si è fatto riferimento al punzone, che oltre ad essere la parte che determina la piega è anche quella che rimane fissa durante il processo. La telecamera è stata quindi disposta in modo da essere ortogonale alla faccia frontale e piana del punzone. L'allineamento con la matrice è stato fatto mantenendo ferma la telecamera ed orientando la matrice in maniera opportuna facendo sempre riferimento al piano frontale del punzone, scelto come feature di riferimento.

Per il posizionamento si è fatto ricorso a una barra retta con sezione quadrata e a delle squadre tarate secondo la normativa DIN 875/0 e DIN 875/1, le cui caratteristiche saranno presentate in seguito.

In *Figura 5.4* si può vedere il set-up realizzato per il sistema di misura.

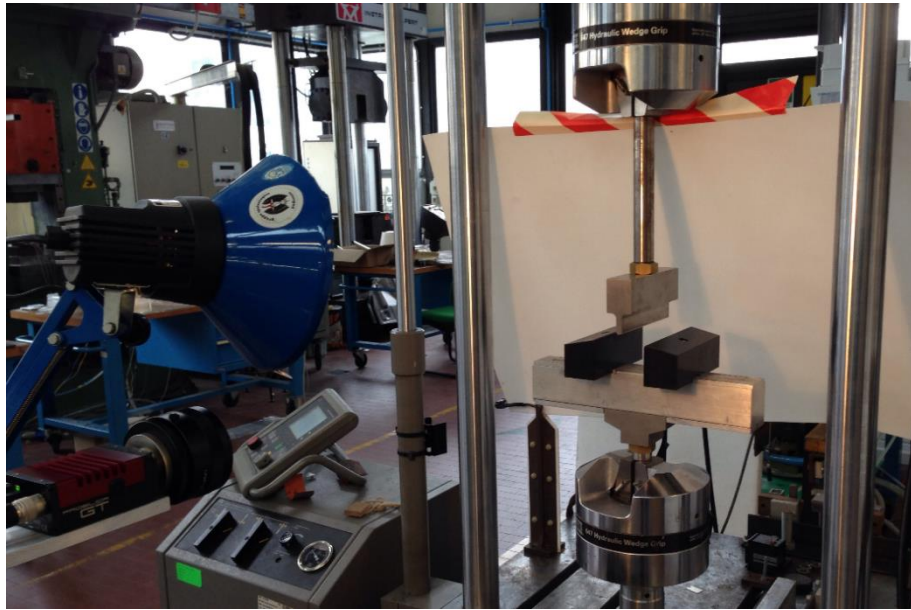


Figura 5.4 Set-up del sistema di visione.

5.1.3 Principali fonti di errore del sistema di misura

Prima di progettare la procedura di prova è stato eseguito uno studio per individuare le principali fonti che possono introdurre errori nel sistema di misura. Questo passaggio risulta di fondamentale importanza perché serve a dare una spiegazione di quali possono essere le cause della variabilità dei dati ottenuti dal sistema di misura e quindi permette di progettare delle procedure per di prova che consentano la quantificazione dell'incertezza di misura derivante da ognuna delle fonti di errore. A questo punto risulterà di conseguenza più semplice trovare l'incertezza di misura totale del sistema, basilare per dare validità alle misure eseguite e per conoscere le potenzialità del sistema messo a punto.

La conoscenza della presenza di queste fonti di errore permette inoltre all'operatore di essere cosciente di quali sono i parametri di maggior rilevanza da tenere sotto controllo durante il funzionamento del sistema di misura. Consente anche una analisi critica dei risultati per capire se qualcuna di queste fonti stia influenzando i risultati delle misure ed operare le opportune correzioni in modo reattivo.

Lo studio è stato eseguito dapprima individuando sei macro classi di fonti di errore tipiche per i sistemi di misura ottici, dopodiché all'interno di ogni classe sono state indicate ed analizzate le principali cause di errore per il sistema messo a punto in questo lavoro.

Le sei macro classi di influenza per i sistemi di misura ottici sono legate all'hardware, all'ambiente, all'oggetto in esame, alla strategia di misura, all'elaborazione dei dati e ad altri fattori estrinseci al sistema [26].

Per quanto riguarda le fonti di errore legate alla parte hardware del sistema di misura, le più rilevanti cause di errore vengono introdotte dall'ottica e dal sensore della telecamera. Questi infatti danno luogo alla distorsione dell'immagine, cioè ad un difetto di forma dell'immagine che causa la perdita del parallelismo tra rette ed il non rispetto degli angoli nell'immagine acquisita rispetto all'immagine reale. Causa di fatto una distorsione geometrica degli oggetti che devono essere misurati falsando quindi i risultati. Fisicamente questo effetto è dovuto alla differente potenza di ingrandimento delle varie parti del sistema ottico, che in genere varia radialmente rispetto all'asse ottico. L'effetto di questo errore può essere facilmente rimosso tramite l'applicazione di algoritmi correttivi sull'immagine nel processo di calibrazione della stessa.

L'errore di distorsione e la calibrazione dell'immagine vengono descritti in maniera più approfondita nel paragrafo successivo.

Anche il rumore dell'immagine è tra le più importanti cause di errore. Questo consiste in una variazione di intensità casuale dei pixel dell'immagine ed in generale è prodotto dall'elettronica della telecamera, cioè dal sensore o dai vari circuiti. L'influenza del rumore verrà quantificata nella fase di taratura del sistema di misura.

Tra le fonti di errore ambientali le principali sono quelle legate all'illuminazione che, per i sistemi di visione nel campo della luce visibile, risulta essere il fattore più critico. Infatti l'illuminazione determina il modo con cui l'immagine verrà acquisita e, in base alla tecnica con cui viene realizzata, i dettagli che verranno risaltati nell'immagine. È fondamentale dunque realizzarla in modo consona all'applicazione alla quale il sistema di visione è destinato. Nonostante gli algoritmi di analisi ed elaborazione dell'immagine consentano una certa stabilità di calcolo anche in condizioni di illuminazione variabili, cambiamenti troppo elevati potrebbero non garantire la ripetibilità dei risultati. Altri fattori di errore ambientali sono legati, come per tutti i sistemi di misura di parametri dimensionali, alla temperatura e alle vibrazioni. Le variazioni di temperatura nel caso studiato non sono da considerarsi causa di dilatazioni rilevanti per le misure effettuate e quindi si ritengono trascurabili. Anche per quanto riguarda le vibrazioni, in questa applicazione, non sono causa di rilevanti variazioni per le misure considerata la rigidità della macchina su cui sono state eseguite le prove e le forze di piegatura in gioco. In ogni caso questi fattori devono essere tenuti in considerazione nel caso di variazione delle condizioni operative.

Una classe di fonti di errore che assume un peso rilevante per i sistemi di misura ottici è quella legata alle condizioni dell'oggetto. All'interno di questa categoria rientrano innanzitutto le caratteristiche ottiche della superficie dell'oggetto da esaminare, infatti, se questo ha un indice di riflessione molto elevato la luminosità che viene rilevata in fase di scansione dell'immagine potrebbe influire anche sui pixel adiacenti. Questo fenomeno diventa rilevante nella zona del bordo dell'oggetto perché può

essere causa di poca nitidezza del contorno dell'oggetto nell'immagine che di conseguenza apparirà sfocato. Questa fonte di errore risulta essere critica per la presente applicazione basata sull'identificazione appunto del bordo della lamiera. Per l'esecuzione delle prove sono stati utilizzati dei provini di lamiera in alluminio, per ridurre i problemi appena discussi legati alla lucidità della superficie in esame, è stato scelto di verniciare il profilo dei lamierini con una vernice nera opaca.

Un'altra fonte di errore dovuta all'oggetto è legata alle zone accessibili dello stesso, infatti, come discusso precedentemente, i tratti considerati nell'analisi devono rappresentare in maniera idonea le caratteristiche del lamierino. Durante l'operazione di piegatura non devono quindi essere presenti ostacoli nel campo visivo che rendano inaccessibili le varie zone del provino. Nel caso della piegatura su tre punti, data la relativa semplicità della configurazione, non sono stati riscontrati grossi problemi nella definizione delle zone di ricerca dei bordi della lamiera.

Deve essere presa in considerazione anche la finitura superficiale del bordo del lamierino, l'eventuale presenza di irregolarità dovuta alla presenza di bave, risultato del processo di taglio, potrebbe influire in modo negativo in fase di interpolazione dei punti del contorno rilevati.

Le cause di errore dovute alla strategia di misura dipendono innanzitutto dalla definizione del campo di misura e delle regioni di interesse. La definizione di queste ultime deve essere fatta in modo accorto e sulla base della conoscenza dei criteri di funzionamento del programma di misura utilizzato (Angle Measure). È richiesta infatti la definizione delle aree di ricerca dei punti del bordo della lamiera per eseguirne il fitting lineare, di conseguenza le aree selezionate, oltre a contenere zone di lamiera accessibili, non devono contenere altre feature lineari della scena e devono evitare di contenere tratti incurvati di lamiera per non creare deviazioni della retta interpolatrice.

Altre fonti di errore provengono dalla programmazione della parte software del sistema di misura e quindi dall'elaborazione dell'immagine tramite il programma Angle Measure. Nonostante l'utilizzo di tecniche subpixel che incrementano l'accuratezza delle varie funzioni utilizzate, saranno sempre introdotti degli errori causati dalle approssimazioni che vengono effettuate. Infatti i bordi di lamiera tra i quali viene effettuato il calcolo dell'angolo di piega vengono descritti nel programma tramite le feature lineari che meglio li descrivono (tramite la tecnica delle minime distanze al quadrato). Nella realtà però questi bordi non sono lineari ma hanno un profilo stocastico o potrebbero addirittura essere incurvati. Ciò comporta che l'approssimazione lineare che si esegue del bordo dipenda strettamente dalla tratto di lamiera considerato e di conseguenza che questo abbia innumerevoli possibili rappresentazioni. Per tenere conto di questo vengono presi in considerazione solo dei brevi tratti adiacenti alla piega in modo che la differenza tra le varie rappresentazioni lineari di ognuno sia trascurabile.

Inoltre i parametri di ricerca e fitting devono essere impostati in modo accurato in base alle condizioni nelle quali si opera in modo da rendere più stabili i risultati delle varie funzioni.

Altre fonti di errore che influiscono sul sistema di misura possono essere esterne al sistema stesso ed introdotte dall'operatore ad esempio. È necessaria infatti una fase di formazione dell'operatore che deve utilizzare il sistema di misura. Senza le necessarie conoscenze dei criteri di funzionamento del sistema, sia delle sue componenti hardware che di quelle software, e dei concetti di metrologia l'operatore di fatto non è in grado di utilizzare il sistema di misura in modo affidabile.

Il sistema potrebbe anche essere influenzato da errori di prospettiva legati all'inaccurato set-up di prova e a cattivi posizionamenti di telecamera e sistema di illuminazione. Anche gli errori di prospettiva possono essere corretti durante la fase di calibrazione dell'immagine.

Tutte queste fonti di errore contribuiscono a dare incertezza al risultato della misura eseguita e devono di conseguenza essere tenute tutte sotto controllo.

Alcune di queste sono state quantificate e conteggiate per la definizione dell'incertezza del sistema di misura seguendo la norma ISO ENV 13005 "*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*" [27][28].

Riassumendo, le principali fonti di errore, divise in macro classi, sono le seguenti:

- **Hardware:** ottica e sensore della telecamera, rumore nell'immagine.
- **Ambiente:** illuminazione, vibrazioni, temperatura.
- **Oggetto in esame:** opacità superficiale, zone accessibili, finitura superficiale.
- **Strategia di misura:** definizione del campo di misura e delle regioni di interesse.
- **Elaborazione dei dati:** legate alla tecnica di programmazione.
- **Fattori estrinseci:** legate all'operatore, al set-up del sistema di visione e ai posizionamenti.

5.1.4 Calibrazione dell'immagine

Il primo passo fondamentale per eseguire delle misurazioni tramite un sistema di visione è quello di eseguire la calibrazione spaziale dell'immagine. Questa infatti costituisce il processo che esegue il calcolo per la trasformazione di unità di misura da pixel ad un'altra unità (ad esempio millimetri o pollici) tenendo conto di vari errori del sistema visivo e correggendoli. Non sarebbe altrimenti possibile eseguire misurazioni accurate con tale sistema di misura.

I principali errori che vengono corretti sono l'errore di distorsione e l'errore di prospettiva, vedi *Figura 4.6*.

Il procedimento di calibrazione spaziale per ottenere la relazione tra pixel e millimetri in ogni punto dell'immagine viene eseguito preliminarmente all'esecuzione dei programmi e della misure utilizzando come riferimento una griglia di punti con caratteristiche geometriche note. Questa griglia di calibrazione viene posta sullo stesso piano in cui si eseguiranno le misure, cioè il piano focale, in modo da coprire l'intera immagine ripresa dalla telecamera.

Per il sistema di misura in esame è stata scelta, tra le griglie di calibrazione disponibili, quella con distanza massima tra i punti di 90x72 mm che ricopre in maniera soddisfacente il campo visivo. La distanza da punto a punto sia in direzione orizzontale che in direzione verticale è di 9 mm e il diametro dei punti è di 2 mm. Questa griglia è mostrata in *Figura 5.5*.

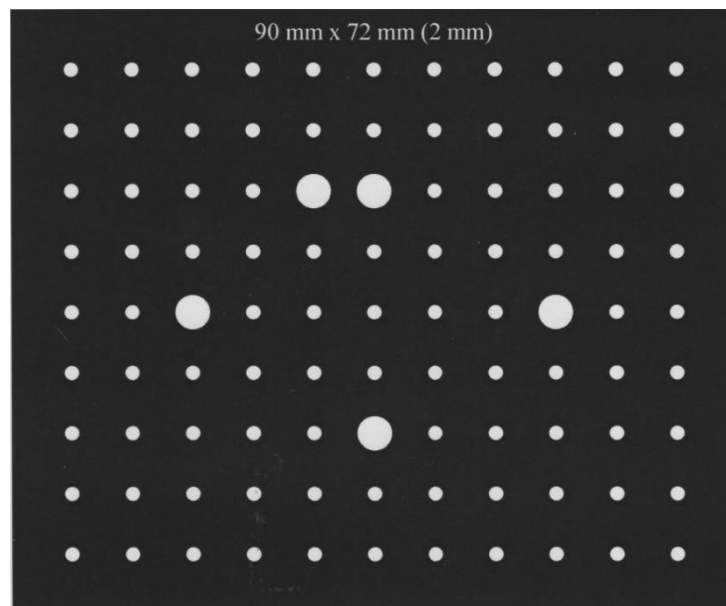


Figura 5.5 Griglia di calibrazione utilizzata

Inserite in input alla funzione di calibrazione le caratteristiche geometriche note della griglia di riferimento, il software inizialmente compie una fase di apprendimento delle caratteristiche della griglia per poi elaborare l'immagine acquisita per ricostruire la geometria nota applicando prima un algoritmo lineare per la correzione dell'errore di prospettiva e poi un algoritmo non lineare per la correzione dell'errore di distorsione. A questo punto è in grado di elaborare i coefficienti di conversione da pixel a millimetri in ogni punto dell'immagine.

Le informazioni così ottenute sono valide solo per il set-up esaminato. Cambiando la configurazione del sistema è necessario eseguire una nuova calibrazione del sistema di misura per garantirne l'accuratezza.

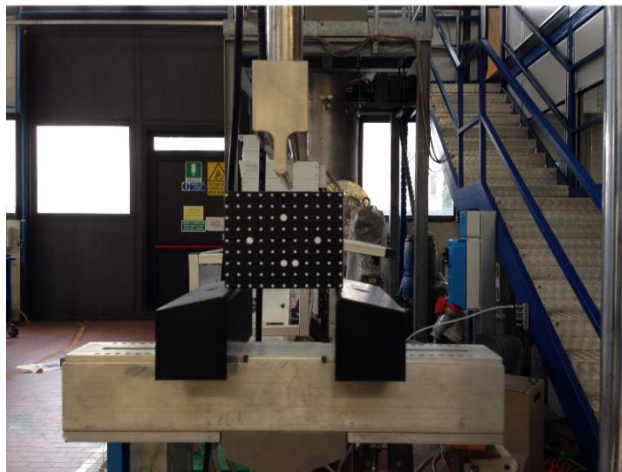
La calibrazione dell'immagine è stata eseguita utilizzando il software *NI Vision Assistant*, grazie al quale è stato possibile implementare l'algoritmo di calibrazione in modo semplice ed intuitivo. Inoltre è stato possibile salvare i dati ottenuti in un file allegato alla sessione della telecamera. In questo modo, all'avvio dell'esecuzione del programma *Angle Measure* in ambiente *LabVIEW*, l'informazione di calibrazione è stata richiamata nella fase di inizializzazione della telecamera ed è stata applicata a tutte le immagini acquisite durante l'esecuzione del programma.

La scelta di non eseguire la calibrazione all'interno del programma creato è stata fatta per non dover ripetere ad ogni avvio del programma tale operazione molto onerosa in termini di tempo soprattutto al momento dell'applicazione dell'algoritmo non lineare di correzione della distorsione.

Dal momento che il sistema di misura è stato utilizzato in due modalità diverse, con formato d'immagine 1600x1200 a piena risoluzione e formato d'immagine 1600x600 a risoluzione verticale dimezzata, è stato necessario di conseguenza eseguire la calibrazione in entrambe le modalità.

I dati ottenuti sono stati salvati su due file diversi che sono stati richiamati corrispondentemente alla rispettiva modalità di prova.

Rimanendo invariata sia la configurazione di piegatura che la posizione della telecamera, le calibrazioni nelle due modalità sono state fatte in successione utilizzando lo stesso set-up di calibrazione mostrato in *Figura 5.6*.



a



b

Figura 5.6 Calibrazione immagine. a) Set-up per la calibrazione. b) Posizionamento della griglia calibrata sul piano focale.

Attraverso *NI Vision Assistant* si è dunque proceduto, per entrambe le modalità, all'acquisizione di una serie di immagini della griglia di calibrazione e alla successiva applicazione della funzione "Image Calibration". È stato scelto di eseguire la calibrazione nella modalità "Distorsion Model

(Grid)” che è quella finalizzata ad applicazioni metrologiche. Questa permette di valutare e correggere gli errori di distorsione tramite una funzione polinomiale ricavata da varie immagini della griglia calibrata. La calibrazione è stata eseguita su 15 immagini per entrambe le modalità. *NI Vision Assistant* guida passo a passo l’identificazione dei punti, la caratterizzazione della geometria della griglia, la scelta della precisione di correzione e il processo di correzione, la scelta dell’origine per un sistema di coordinate ed il salvataggio del file con i risultati della calibrazione.

Per quanto concerne la precisione di correzione è stato scelto di utilizzare la massima precisione possibile che si basa sull’utilizzo di una polinomiale del terzo ordine e sulla correzione della distorsione anche nelle direzioni tangenziali. Questa ha richiesto un maggior tempo di implementazione a fronte però di una maggiore accuratezza dei risultati della correzione.

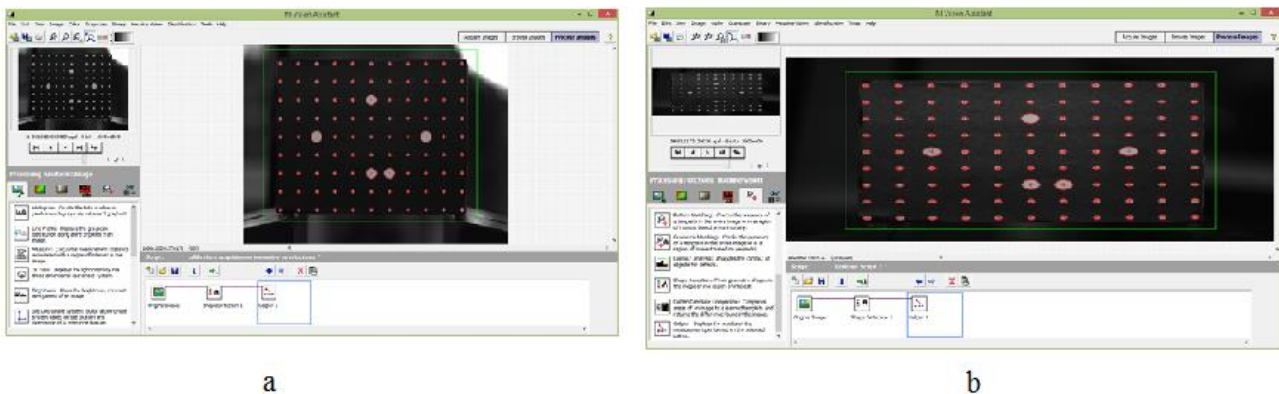


Figura 5.7 Fasi della calibrazione dell’immagine. a) Modalità 1600x1200 con binning verticale = 1. b) Modalità 1600x600 con binning verticale = 2.

Dal confronto dei risultati della calibrazione si è ovviamente notato un maggiore errore nelle immagini ricavate nella modalità con risoluzione verticale dimezzata, però, cosa più importante per l’applicazione del programma in questa modalità, si sono potuti ricavare i coefficienti di correzione per ricondurre la geometria “schiacciata” delle immagini alla geometria reale del componente, vedi *Figura 5.7*.

Questo processo ha inoltre consentito di determinare la risoluzione media dell’immagine sia in direzione verticale che in direzione orizzontale. I valori ricavati sono riportati in *Tabella 5.2*.

5.1.5 Taratura del sistema di misura

La taratura del sistema di misura è stata fatta anch’essa per entrambe le modalità di prova. Tramite questa è stato possibile determinare le caratteristiche metrologiche del sistema di misura, quali accuratezza, sensibilità e ripetibilità, necessarie per definire le funzionalità del sistema messo a

punto. Inoltre è stato possibile, attraverso l'analisi delle caratteristiche metrologiche, determinare la precisione del sistema di misura espressa in termini di incertezza di misura.

Per entrambe le modalità di prova si è eseguita la taratura suddividendola in tre fasi:

1. Definizione del rumore.
2. Definizione dell'accuratezza.
3. Definizione della sensibilità.

Una volta definite queste caratteristiche metrologiche è stato possibile fare il computo dell'incertezza di misura del sistema nelle due modalità.

I valori di angolo misurati sono stati arrotondati alla seconda cifra decimale in fase di programmazione. Si ritiene infatti caso soddisfacente riuscire apprezzare il centesimo di grado sulla misura dell'angolo. La bontà di questa scelta è stata confermata dal risultato di incertezza di misura ottenuto che, essendo superiore a questo valore, rende inutile prendere in considerazione ulteriori cifre significative dopo la virgola.

Vengono ora presentate nel dettaglio le varie fasi.

- Definizione del rumore

La definizione del rumore è stata fatta tramite misure statiche di un angolo fisso di 0° e di un angolo fisso di 90° . In entrambe le modalità sono stati memorizzati per qualche minuto i valori dell'angolo calcolati nell'immagine e poi si è passati all'analisi statistica dei dati acquisiti per la quantificazione del rumore.

Per quanto riguarda l'angolo di 0° questo è stato realizzato usando come campione il lato di una squadra tarata secondo la normativa DIN 875/1 per la quale è prevista una tolleranza di rettilineità. L'angolo di 90° è stato realizzato tramite la medesima squadra ed è stata utilizzata anche un'altra squadra tarata secondo la normativa DIN 875/0 con tolleranza geometrica sull'angolo. Le caratteristiche metrologiche previste da tale normativa e l'incertezza di taratura dei campioni sono riportate in *Tabella 5.3*.

Dalle prove di misura dell'angolo di 0° si è ricavato subito il valore del rumore mentre con la misura dell'angolo di 90° si è prima eseguita una normalizzazione e poi valutato il rumore.

Nel caso di immagine a piena risoluzione in formato 1600x1200 si è apprezzata un'oscillazione dei risultati attorno al valore centrale di ampiezza di $\pm 0,01^\circ$, mentre a risoluzione verticale dimezzata con formato d'immagine 1600x600 l'ampiezza rilevata è stata di $\pm 0,02^\circ$.

- Definizione dell'accuratezza

La definizione dell'accuratezza è stata fatta tramite misure statiche della squadra tarata secondo la normativa DIN 875/1 con angolo di 90° , vedi *Figura 5.8*. Le misurazioni dell'angolo su questo campione sono state ripetute in varie zone del campo di misura cercando di coprirlo almeno per il 66% come da indicazione della normative ISO 10360 e VDI/VDE 2617 [29] [30]. Questo è stato fatto per verificare la ripetibilità della misura nelle varie zone del campo di misura. Sono state eseguite 24 misurazioni per ognuna delle due modalità di prova.

In *Figura 5.9* viene mostrato un esempio di misure dell'angolo della squadra tarata tramite il programma Angle Measure nelle due modalità di prova.

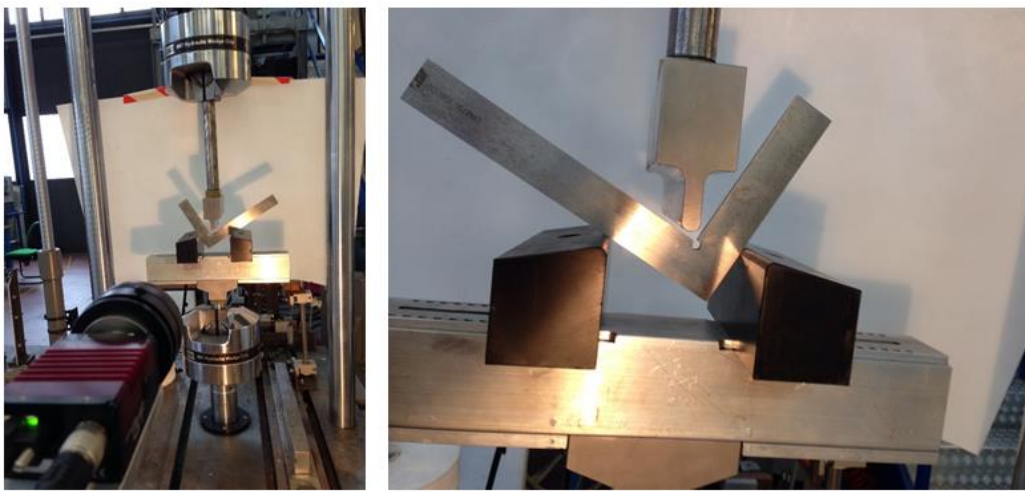


Figura 5.8 Set-up delle prove di accuratezza.

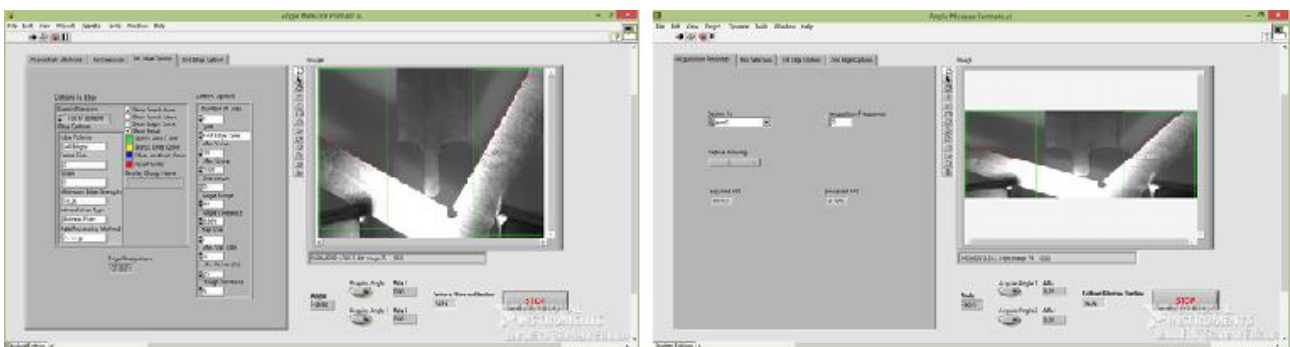


Figura 5.9 Misure della squadra tarata nelle due modalità di prova.

In entrambe le modalità è stata ottenuta una distribuzione gaussiana dei risultati delle misure, centrata sul valore medio pari a $90,00^\circ$ con deviazione standard inferiore ad un centesimo di grado nella modalità a piena risoluzione con formato 1600×1200 , mentre con binning verticale pari a 2 e formato

1600x600 come ci si aspettava la deviazione standard rilevata è stata maggiore e quasi il doppio del caso precedente.

Tabella 5.3 Tolleranze ed incertezze delle squadre tarate ricavate dai relativi certificati di taratura.

	Squadra DIN 875/0	Squadra DIN 875/1
Dimensione [mm]	200x130	100x75
Tolleranza rettilineità [μm]	17x20	7x7
Incertezza sull'angolo [$^{\circ}$]	$\pm 0,010$	$\pm 0,007$

- Definizione della sensibilità

La sensibilità del sistema di misura è stata definita mediante misure dinamiche eseguite durante l'operazione di piegatura su un lamierino. È stata eseguita una variazione angolare a step decrescenti per diverse velocità del pistone per determinare la minima variazione di angolo che il sistema è in grado di rilevare.

Per imporre le variazioni angolari è stato deformato un lamierino avendo l'accortezza nelle fasi di riduzione del carico di rimanere nel campo del ritorno elastico e quindi di riuscire a recuperare tutta la deformazione imposta.

Essendo queste prove di tipo dinamico si è potuto apprezzare anche la capacità del sistema di acquisizione dati durante la fase del transitorio.

In *Figura 5.10* è mostrato il set-up di prova.

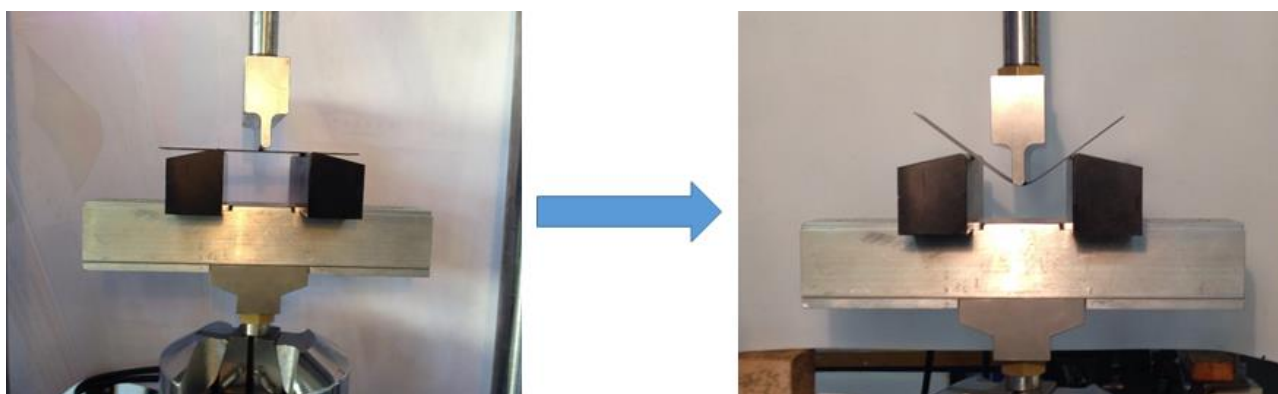


Figura 5.10 Esecuzione delle prove per determinare la sensibilità.

In entrambe le modalità di prova si è rilevata una sensibilità del sistema di misura di $0,02^{\circ}$. Variazioni angolari inferiori non sono rilevabili in quanto il rumore del sistema non permette di distinguerle in modo chiaro.

Per quanto riguarda la capacità del sistema di apprezzare la fase del transitorio, all'aumentare della velocità del pistone si è notato la maggior densità di dati acquisibile con la modalità a risoluzione verticale dimezzata.

Terminate queste prove è stata determinata l'incertezza del sistema di misura. Le incertezze che sono state computate nel calcolo sono quelle causate dal rumore, dall'accuratezza, cioè quelle legate alla ripetibilità e all'incertezza del campione misurato, e dalla sensibilità dello strumento.

Ognuno di questi contributi dà luogo ad una variabilità dei risultati che ha una certa distribuzione caratteristica. Per quanto riguarda la ripetibilità, questa derivando da un'analisi statistica di dati con distribuzione gaussiana rientra tra le incertezze di tipo A. Le altre invece sono incertezze di tipo B e devono essere ricondotte a delle distribuzioni normali tramite opportuni coefficienti di conversione. Per i risultati delle prove di rumore è stata assunta una distribuzione triangolare con limiti i valori riportati sopra. L'incertezza del campione è stata considerata con distribuzione rettangolare con estremi corrispondenti ai valori indicati sul certificato di taratura, mentre per le prove di sensibilità è stata assunta una distribuzione a step. Quelle scelte sono le distribuzioni tipiche che caratterizzano i contributi considerati. ^[26]

A questo punto è stato possibile calcolare l'incertezza combinata tenendo conto dei vari contributi per calcolare infine l'incertezza estesa del sistema di misura con fattore di copertura $k=2$, cioè con una confidenza del 95%.

In entrambe le modalità i risultati sono stati ottenuti dalle prove risultati compatibili e, come atteso, il valore dell'incertezza di misura operando a piena risoluzione è inferiore al caso con risoluzione verticale dimezzata. In ogni caso che la differenza tra i due valori è molto contenuta.

5.1.6 Campagna prove per determinare della sensibilità del sistema di misura

Come detto sopra le prove sono state eseguite imponendo delle variazioni angolari a step. Queste variazioni vengono di fatto realizzate dallo spostamento verticale della matrice di piegatura in direzione del punzone e quindi sono state eseguite controllando la corsa del pistone della MTS su cui è montata la matrice. In base alle variazioni angolari desiderate sono state calcolate le corse necessarie per ottenerle tramite un calcolo geometrico riferito alla configurazione della piegatura. Una volta determinate i valori delle corse desiderate si è passati alla fase di programmazione della macchina di carico MTS in modalità di controllo di spostamento.

In totale sono state realizzate 10 prove in modalità a piena risoluzione che poi sono state ripetute in modalità a risoluzione verticale dimezzata per poter confrontare le prestazioni operative dei due formati di immagine nelle stesse condizioni.

Nelle prime 5 prove sono state realizzate in sequenza delle variazioni angolari decrescenti fino ad arrivare ad un valore minimo di 1° intervallate da un periodo di attesa di 2 secondi tra una e l'altra. Tra una prova e l'altra le variazioni angolari sono state mantenute costanti incrementando però via via la velocità del pistone da 1 mm/s a 20mm/s.

Nelle successive 5 prove si è proceduto nello stesso modo realizzando questa volta, tramite lo spostamento del pistone, variazioni angolari decrescenti a partire dal valore 1° e andando verso valori inferiori. Le variazioni angolari sono state sempre più fitte al decrescere dell'angolo.

La corsa minima del pistone pari a 0,005 mm, a cui corrisponde una variazione angolare di un centesimo di grado, è stata realizzata solo nella prova numero 6 ad una velocità del pistone molto bassa, pari a 0,5 mm/s, per garantire la precisione di posizionamento della MTS nel realizzare questo spostamento. Inoltre a velocità maggiori si rischierebbe di introdurre delle vibrazioni indesiderate del lamierino che non consentirebbero l'ottenimento di dati affidabili.

Vengono riportati in dettaglio le procedure delle prove realizzate:

- **Prova 1:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 1 mm/s
- **Prova 2:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 3 mm/s
- **Prova 3:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 10 mm/s
- **Prova 4:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 15 mm/s
- **Prova 5:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 20 mm/s
- **Prova 6:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 / 0,005 mm
Velocità pistone: 0,5 mm/s
- **Prova 7:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
Velocità pistone: 1 mm/s
- **Prova 8:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
Velocità pistone: 10 mm/s

- **Prova 9:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
Velocità pistone: 15 mm/s
- **Prova 10:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
Velocità pistone: 20 mm/s

5.1.7 Campagna prove per il calcolo del fattore di ritorno elastico K

Sono stati eseguiti dei test su dei provini di lamiera per sperimentare anche la risposta del sistema nel calcolo del fattore di ritorno elastico K.

Le prove sono state eseguite misurando il fattore ritorno elastico su due tipi di materiale diverso. Le caratteristiche geometriche dei provini sono riportate in *Tabella 5.4*.

Per i lamierini in AA 5083 è stato imposto un angolo di piega di circa 75°, mentre per quelli in AA 6016 è stato imposto un angolo di piega di circa 60°. Con il programma Angle Measure è stata eseguita la misurazione in real-time dell'angolo effettivo di piega e dell'angolo dopo la rimozione del carico. Appena disponibili entrambi i dati il programma ha restituito il valore del fattore di ritorno elastico K. In *Figura 5.11* vengono mostrate alcune fasi della prove eseguite.

In ogni test si è avuta l'accortezza di posizionare il lamierino nel piano focale della telecamera utilizzando le due squadre tarate citate sopra.

Per ogni tipo di provino sono state fatte 10 prove per poter verificare la ripetibilità della misura.

Tabella 5.4 Caratteristiche geometriche dei provini usati per il calcolo di K.

Materiale	AA 5083	AA6016
L [mm]	200	200
B [mm]	50	75
s [mm]	1	1

Per ogni prova il fattore di ritorno elastico K è stato calcolato contemporaneamente nelle due modalità esaminate per avere un confronto diretto delle prestazioni nell'eseguire la stessa misura.

Essendo K misurato indirettamente come rapporto di due misure dirette, ognuna con la propria incertezza, dell'angolo di piegatura imposto dal punzone e di quello risultante dopo la rimozione del carico, bisogna tenere conto della propagazione dell'incertezza nel calcolo.

Nella modalità di prova con binning verticale pari a 2, avendo una maggiore incertezza di misura sull'angolo e di conseguenza anche sul calcolo del fattore di ritorno, si è previsto che i risultati delle prove avessero una distribuzione gaussiana centrata su un valore medio leggermente scostato rispetto

a quello della rispettiva distribuzione gaussiana ottenuta in modalità a piena risoluzione e che inoltre la deviazione standard dalla media fosse maggiore.

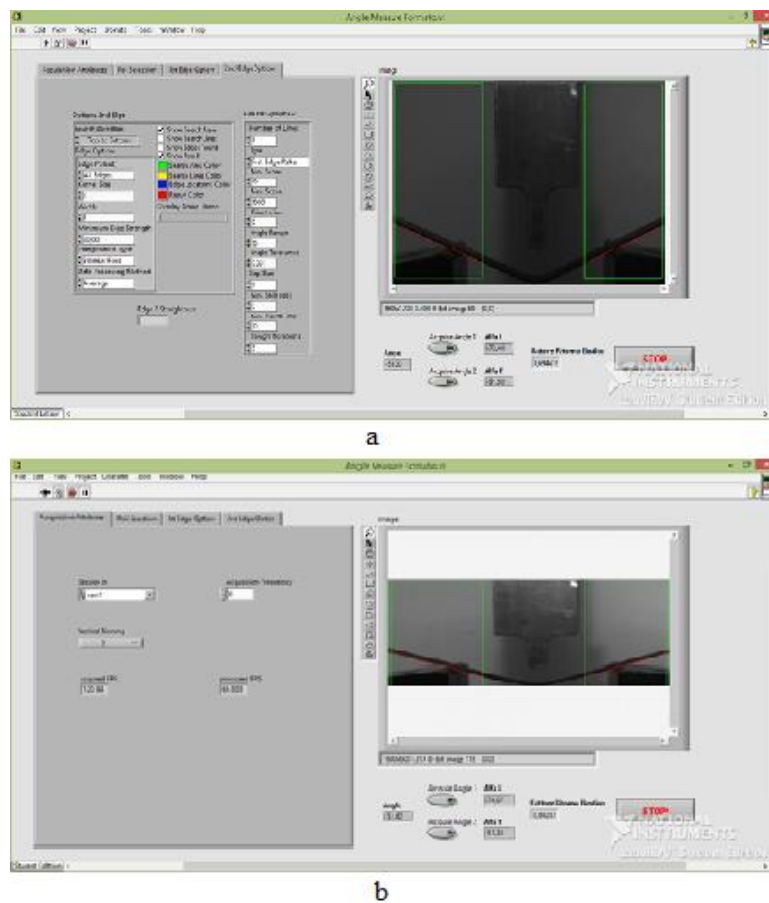


Figura 5.11 Prove di calcolo del fattore di ritorno elastico K. a) Modalità 1600x1200, binning verticale = 1. b) Modalità 1600x600, binning verticale = 2.

5.2 Misura dello spostamento relativo tra marker

In questa sezione della tesi viene trattata la soluzione proposta per la misura in real-time dello spostamento relativo tra i marker apposti sugli stampi di una pressa a vite durante l'operazione di forgiatura a freddo.

In questo caso le prove sono state svolte sia sulla macchina di carico universale MTS presentata precedentemente ed in parte sulla pressa a vite Vaccari presente nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova.

La misura è stata fatta individuando i marker nelle immagini acquisite dalla telecamera del sistema di visione e monitorandone e memorizzandone la posizione tramite il programma Find Template in

ambiente LabVIEW. Si sono così potuti calcolare gli spostamenti come differenza tra le posizioni del marker in immagini successive.

Dopo una prima analisi del problema per l'individuazione dei vincoli progettuali presenti e l'analisi delle principali fonte di errore è stata eseguita la taratura del sistema per determinarne le caratteristiche metrologiche e l'incertezza sulla misura degli spostamenti. Queste prove sono state eseguite sulla MTS sfruttando l'attrezzatura utilizzata per la piegatura della lamiera ed applicando i marker sul punzone e sulla matrice.

Sempre con la stessa configurazione sono state effettuati anche dei test per determinare le prestazioni del sistema di misura ed in particolare per definire la velocità di spostamento massima del marker rilevabile con la telecamera. Durante questi test è stata studiata anche la soluzione per l'incremento del frame rate della telecamera per consentire di ottenere dati più significativi alle elevate velocità di spostamento.

A questo punto è stato fatto l'attrezzaggio della pressa a vite per la forgiatura a freddo in stampo aperto e l'applicazione dei marker sugli stampi piani.

In entrambe le configurazioni è stata eseguita la calibrazione dell'immagine per la correzione degli errori di prospettiva e di distorsione.

In questa configurazione è stato prima rilevato il rumore nell'immagine causato dalle vibrazioni della pressa e poi sono stati eseguiti dei test "a vuoto", cioè senza la deformazione di nessun provino, per la misurazione degli spostamenti in direzione orizzontale ottenuti dall'applicazione di un carico verticale di diverse intensità e per la determinazione l'influenza del gioco presente sulle guide della mazza.

Successivamente sono state eseguite delle prove di forgiatura su un componente a forma di prisma trapezoidale in modo da introdurre un carico agente in direzione orizzontale. In questo caso sono state eseguite le misurazioni dello spostamento orizzontale degli stampi al variare dell'intensità del carico orizzontale a parità di quello verticale.

5.2.1 Ambiente di prova: pressa a vite "Vaccari"

Le prove di forgiatura sono state eseguite su una pressa a vite della "Serie PS" prodotta da *Vaccari spa*, mostrata in *Figura 5.12*. Le macchine di questa serie, disponibili in varie taglie, hanno le caratteristiche di elevata compattezza e robustezza e sono state progettate per soddisfare richieste di alta cadenza produttiva. La semplicità di utilizzo di queste presse è garantita da un dispositivo elettronico chiaro e user-friendly che consente una rapida impostazione dei parametri di lavoro della macchina.

Vengono riportati in *Tabella 5.5* i dati di targa della pressa a disposizione in laboratorio.



Figura 5.12 Pressa a vite Vaccari.

Tabella 5.5 Dati di targa pressa a vite Vaccari.

Forza Nominale	2300 kN
Diametro vite	150 mm
Corsa Mazza	320 mm
Peso complessivo	69 kN
Peso mazza	4,5 kN
Dimensioni	Lunghezza: 2000 mm Larghezza: 2050 mm Altezza: 3700 mm
Motore Elettrico	Siemens 15 kW
Pressione aria salita/discesa	2,2 bar

5.2.2 Set-up del sistema di misura

Il primo passo per il set-up del sistema di misura è stato la definizione del campo visivo della telecamera. In questo caso è stato scelto di far coincidere la dimensione maggiore dell'immagine, cioè quella a cui corrisponde la lunghezza di 1600 pixel, con la direzione di spostamento della mazza, quindi con la direzione verticale. Lo scopo infatti dell'applicazione è quello di poter monitorare lo spostamento del marker e quindi questo deve essere contenuto nel campo visivo anche al variare dell'altezza del componente da forgiare.

La telecamera è stata dunque ruotata di 90° attorno al suo asse ottico rispetto alla configurazione applicata alla piegatura della lamiera. Lo spostamento verticale della mazza viene di conseguenza visualizzato a monitor come un movimento in direzione orizzontale. La scelta di non ruotare l'immagine sul display è stata fatta per non gravare la CPU di ulteriori calcoli che a bassi frame rate non hanno alcun effetto, ma all'aumentare della velocità di acquisizione farebbero diventare il tempo di elaborazione il collo di bottiglia dell'acquisizione dati.

Per il marker è stata scelta una forma circolare in quanto questa geometria semplice permette al calcolatore di eseguire la ricerca ed il posizionamento in modo più veloce rispetto a quanto si avrebbe con una geometria del marker più complessa.

Dalla dimensione del marker, diametro 5,4 mm circa, e dalla stima dell'altezza massima per il componente da forgiare, fissata a 50 mm, è stata fissata per la direzione verticale del campo visivo la dimensione di 100 mm. D'ora in avanti, per l'applicazione nel rilevamento dei marker, la dimensione maggiore del formato di immagine è da intendersi quella corrispondente alla direzione verticale di movimento della mazza.

Con formato di immagine 1600x1200 il campo visivo sarà dunque di circa 100x75 mm.

Il problema dell'incremento del frame rate in questo caso è stato affrontato andando a ridurre il formato dell'immagine restringendo anche il campo visivo. Infatti la dimensione orizzontale di 75 mm può tranquillamente essere ridotta senza compromettere l'acquisizione dello spostamento orizzontale dei marker e consentendo di aumentare la frequenza di acquisizione senza ridurre la risoluzione dell'immagine, parametro importante per il matching accurato della geometria di riferimento. È stata fatta, a questo punto, una prima stima dello spostamento orizzontale massimo ottenibile dello stampo superiore che è stata fissata a 1mm, tenendo conto delle dimensioni del marker si ritiene sufficiente avere un campo visivo con dimensione orizzontale di 7,5 mm a cui corrispondono 120 pixel. Non possono però, in questo caso, essere trascurate le vibrazioni della pressa che risultano quindi vincolanti per la scelta del campo visivo. Di conseguenza è stato scelto di studiare un'altra configurazione di prova in cui il campo di immagine in direzione orizzontale è stato ampliato a circa 12,5 mm, corrispondenti a circa 200 pixel.

In definitiva sono state studiate le prestazioni nei formati 1600x1200, 1600x200 e 1600x120. I principali parametri di acquisizione in queste tre modalità sono riportati in *Tabella 5.6*. Si noti che la risoluzione non cambia visto che in questo caso non viene utilizzata la funzione di binning.

La taratura del sistema e i test delle prestazioni sono stati fatti sulla MTS utilizzando, come detto sopra, l'attrezzatura di piegatura della lamiera e applicando i marker su punzone e matrice, come si può vedere in *Figura 5.13*.

Il posizionamento della telecamera è stato fatto come nel precedente caso solo che è stata ruotata la telecamera e ridotta la distanza di lavoro. Prima di eseguire le prove è stata realizzata la calibrazione dell'immagine.

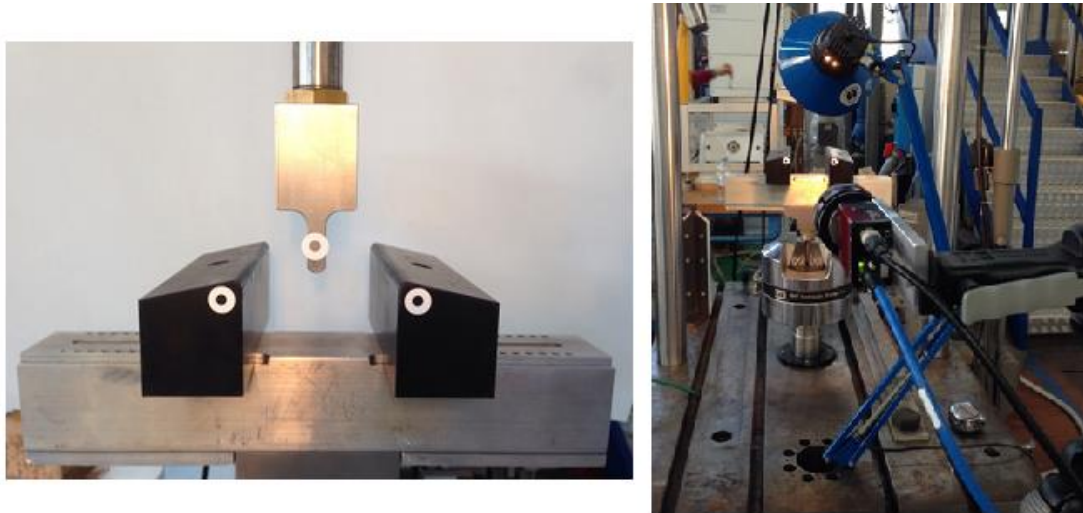


Figura 5.13 Set-up del sistema di visione per le prove sulla MTS.

Per quanto riguarda invece le prove sulla pressa a vite il posizionamento è stato fatto allineando la telecamera in modo perpendicolare al piano frontale dello stampo inferiore sempre tramite una la barra e le squadre tarate sopra citate. Prima di applicare i marker di colore bianco sulle superfici degli stampi, queste sono state verniciate con il colore nero opaco per aumentare il contrasto e renderne più accurata la localizzazione tramite il programma Find Template.

L'illuminazione è stata realizzata tramite due lampade al neon poste ai due lati della telecamera e dei marker in modo da illuminare in modo pressoché costante tutta la loro zona di spostamento.

Il set-up del sistema è mostrato in *Figura 5.14*.



Figura 5.14 Set-up del sistema di visione per le prove sulla pressa a vite Vaccari.

Tabella 5.6 Confronto tra i principali parametri di acquisizione nei tre formati considerati.

	Formato 1600x1200	Formato 1600x200	Formato 1600x120
Frame Rate [fps]	62,0001240	138,600139	163,907556
Distanza di lavoro [mm]	600	600	600
Campo Visivo [mm]	98,50x74,10	98,50x12,35	98,50x7,41
Risoluzione [μm]	61,67	61,67	61,67

5.2.3 Principali fonti di errore del sistema di misura

Anche in questo caso risulta fondamentale lo studio delle fonti di errore che possono influire sul sistema, oltre che per poter calcolare l'incertezza di misura e poter dare dunque validità ai risultati delle misurazioni, anche per consentire all'operatore di tenere sotto controllo i parametri di maggior rilievo che potrebbero influire sull'accuratezza del sistema di misura.

Come fatto per la piegatura della lamiera le cause di errore sono state raccolte in stesse sei macro classi e vengono di seguito riassunte.

- **Hardware:** ottica e sensore della telecamera, rumore nell'immagine.
- **Ambiente:** illuminazione, vibrazioni, temperatura.
- **Oggetto in esame:** opacità superficiale del marker e della zona in cui il marker è applicato, zone accessibili.
- **Strategia di misura:** definizione del campo.
- **Elaborazione dei dati:** legate alla tecnica di programmazione e alla definizione della geometria del marker.
- **Fattori estrinseci:** legate all'operatore, al set-up del sistema di visione e ai posizionamenti.

Per quanto riguarda le fonti di errore hardware e quelle legate ai fattori estrinseci i maggiori errori che ne conseguono, cioè l'errore di distorsione e quello di prospettiva, vengono corretti tramite la calibrazione dell'immagine che è stata eseguita per ogni set-up utilizzato.

Tra le fonti di errore ambientali in questo caso, oltre all'illuminazione, le vibrazioni diventano un punto critico e vincolante per l'applicazione e quindi non possono essere trascurate. Infatti le vibrazioni della pressa, e quindi dei marker applicati sugli stampi, possono portare il marker stesso ad uscire dal campo visivo del sistema impedendone l'acquisizione. Si pensi infatti di ottenere lo

spostamento orizzontale massimo stimato per lo stampo superiore, le vibrazioni legate al colpo tra gli stampi causano delle vibrazioni che in direzione orizzontale vanno a sommarsi allo spostamento dello stampo. Quando lo spostamento ed il contributo della vibrazione sono equiversi potrebbe, in relazione all'ampiezza della vibrazione, verificarsi l'uscita del marker dal campo di misura.

Per quanto riguarda le fonti di errore legate all'oggetto devono essere prese in considerazione sia le condizioni di opacità superficiale del marker sia quelle della zona ad esso adiacente. Come già detto per aumentare il contrasto per la rilevazione del marker è stata spruzzata della vernice nera sulla faccia dello stampo per rendere più netta l'identificazione della geometria di modello.

Dal punto di vista delle zone di oggetto accessibili è sufficiente che venga inquadrato interamente il foro circolare presente sul marker in quanto è il contorno di questo che è stato designato come modello. Questo ha permesso di operare con campo di misura ancora più ridotti. Si tenga presente che attraverso le funzioni del Geometric Matching che vengono implementate nel programma Find Template sarebbe possibile effettuare la localizzazione del marker anche quando questo non è interamente contenuto nel campo visivo. Questa potenzialità non è però stata sfruttata per non compromettere l'accuratezza di posizionamento che risulta minore nel caso la geometria di modello non sia interamente accessibile.

Gli errori introdotti dalla strategia di misura provengono dalla definizione del campo visivo che deve tenere conto di tutti i vincoli sopra esposti.

Per quanto riguarda gli errori introdotti in fase di programmazione è fondamentale la corretta definizione della geometria del modello. Risulta indispensabile il corretto settaggio, da parte dell'operatore, dei parametri di individuazione ed estrazione dei bordi della geometria cercata. Una cattiva caratterizzazione del modello potrebbe portare ad avere in fase di elaborazione dell'immagine dei falsi matching o anche il non riconoscimento del marker cercato. Per evitare queste conseguenze è molto importante anche l'impostazione di appropriati parametri di ricerca in fase di matching.

Dalla conoscenza di questi fattori sono state progettate le procedure di prova ed è stata calcolata l'incertezza di misura del sistema di visione.

5.2.4 Campagna prove su MTS

La prima parte delle prove è stata eseguita misurando gli spostamenti dei marker applicati sulla matrice dell'attrezzatura del V-bending che è stata movimentata dal pistone della macchina di carico MTS. In questa configurazione, dopo avere fatto la calibrazione dell'immagine, è stata fatta la taratura del sistema di misura.

In questo caso la taratura è stata eseguita per un solo formato di immagine visto che le caratteristiche del sistema rimangono invariate riducendo il formato dell'immagine tramite riduzione del campo visivo. Per l'esecuzione delle prove è stato dunque scelto il formato di immagine 1600x120 in quanto, essendo quello a maggior frame rate, permette di acquisire più dati nell'unità di tempo e visto che in questa configurazione non ci sono vibrazioni e di conseguenza non si corre il rischio di uscire dal campo di misura.

È stato scelto di eseguire questo tipo di prove sulla MTS in quanto questa consente di ottenere un'ottima precisione negli spostamenti indispensabile per la determinazione delle caratteristiche metrologiche del sistema di misura.

La taratura è stata suddivisa in quattro fasi:

1. Definizione del rumore.
2. Definizione dell'accuratezza.
3. Definizione della sensibilità agli spostamenti.
4. Definizione delle prestazioni all'aumentare della velocità di spostamento.

Il sistema di misura messo a punto è in grado di apprezzare spostamenti dell'ordine del micrometro in quanto nell'algoritmo di calcolo vengono utilizzate tecniche subpixel che consentono di ottenere accuratezza nella localizzazione delle feature maggiori della risoluzione dell'immagine.

- Definizione del rumore

La definizione è stata fatta mediante misure statiche della posizione del marker mantenendo il pistone in posizione fissa. I dati sono stati acquisiti per qualche minuto e poi è stata fatta un'analisi statistica per quantificare la sua influenza sulla variabilità delle misure. È stato rilevato un rumore nel posizionamento del marker della telecamera di $\pm 0,002$ mm.

- Definizione dell'accuratezza

L'accuratezza è stata definita mediante il confronto tra la misura dello spostamento fornita in output dal sistema di controllo della MTS e quella rilevata dalla telecamera.

Sono stati decisi arbitrariamente tre valori di spostamento e per ognuno di questi è stata ripetuta la misurazione 25 volte in varie zone all'interno del campo di misura, cercando di coprirlo per almeno il 66%, per testare la ripetibilità del sistema di misura. Gli spostamenti imposti sono stati di 1 mm, 0,5 mm e 0,1 mm.

Avendo preso come riferimento le misure di spostamento della MTS bisogna tenere conto anche del rumore della macchina di carico stessa e della sua precisione negli spostamenti.

Dall'analisi dei dati forniti in output dal sistema di controllo della MTS è stato quantificato il rumore della macchina trovando che questo è di un ordine di grandezza inferiore a quello della telecamera. Questo valore può dunque non essere in quanto per il calcolo dell'incertezza di misura dovrebbe essere elevato al quadrato e sarebbe trascurabile rispetto agli altri effetti. Per quanto riguarda la precisione degli spostamenti della macchina questi vengono misurati tramite un sistema di controllo induttivo con precisione inferiore al micrometro. In via cautelativa si è assunto che la MTS abbia una precisione sugli spostamenti di $\pm 0,001$ mm per non sottovalutare la possibile perdita di funzionalità della macchina dovuta all'uso.

Dalle prove si è ottenuta una distribuzione gaussiana delle misure eseguite per tutti e tre i valori dello spostamento, centrate tutte e tre attorno al valore imposto e con deviazioni standard compatibili.

- Definizione della sensibilità agli spostamenti

La sensibilità del sistema è stata testata tramite misure dinamiche imponendo degli spostamenti a step decrescenti del marker per determinare la minima variazione rilevabile. Tra uno step e l'altro si è programmato un tempo di attesa pari a 2s. La prova è stata ripetuta a diverse velocità del pistone per controllare che non si verificassero cambiamenti di prestazioni all'aumentare della velocità di spostamento. Essendo prove dinamiche, all'aumentare della velocità di spostamento è stato necessario andare ad incrementare anche il frame rate della telecamera per riuscire ad apprezzare in modo soddisfacente le fasi di transitorio. Per questo motivo al crescere delle velocità considerate si sono abbandonati via via i formati che non consentivano di ottenere buone densità di dati.

Il sistema si è rivelato in grado di apprezzare spostamenti fino a 0,005 mm. Oltre questo valore il rumore nell'immagine influiva sui dati acquisiti non consentendo una chiara rilevazione degli spostamenti.

Vengono qui di seguito riepilogate le prove eseguite.

Corsa del pistone: 5 / 1 / 0,5 / 0,1 / 0,080 / 0,070 / 0,065 / 0,060 / 0,055 / 0,050 mm

- **Prova 1:** Velocità pistone: 50 mm/s
- **Prova 2:** Velocità pistone: 75 mm/s
- **Prova 3:** Velocità pistone: 100 mm/s
- **Prova 4:** Velocità pistone: 125 mm/s
- **Prova 5:** Velocità pistone: 140 mm/s
- **Prova 6:** Velocità pistone: 145 mm/s
- **Prova 7:** Velocità pistone: 150 mm/s
- **Prova 8:** Velocità pistone: 155 mm/s

- Definizione delle prestazioni all'aumentare della velocità di spostamento

Queste prove sono state eseguite allo scopo di determinare la velocità di spostamento massima per la quale si riesce ad ottenere una acquisizione dati sufficientemente significativa da rappresentare gli spostamenti del marker. Queste prove sono state eseguite realizzando una corsa del pistone di 20 mm in direzione verticale. Tale valore è stato scelto perché è quello che si stima sia il minimo valore di corsa della mazza nel campo visivo che viene ripreso durante la forgiatura.

Sulla distanza analizzata il sistema di misura ha prestazioni ritenute buone fino ad una velocità di 180 mm/s. A velocità di spostamento superiori il sistema non riesce a rilevare un numero di punti soddisfacente a causa dell'incapacità del sistema di mettere a fuoco l'immagine e quindi per la mancanza di una qualità sufficiente per eseguire il matching.

Le prove sono state eseguite solo nel formato di immagine 1600x120 per poter operare al massimo frame rate della telecamera.

Corsa del pistone: -20 mm (verso il basso)

- **Prova 1:** Velocità pistone: 160 mm/s
- **Prova 2:** Velocità pistone: 170 mm/s
- **Prova 3:** Velocità pistone: 180 mm/s

5.2.5 Geometria dei provini

Lo scopo delle prove sulla pressa è quello di misurare lo spostamento orizzontale degli stampi in differenti situazioni di carico. L'applicazione e la variazione del carico in direzione verticale viene ottenuta dalle normali condizioni di funzionamento della pressa, mentre non si ha la possibilità di realizzare altrettanto per l'applicazione del carico in direzione orizzontale.

Per fare fronte a questo è stato scelto che fosse la geometria dei provini ad indurre un carico in direzione orizzontale negli stampi al fine di provocare il loro disassamento. Questo obiettivo è stato raggiunto realizzando la forgiatura di un componente asimmetrico.

I provini sono stati dunque realizzati con forma di prisma con base a trapezio rettangolo.

Le variazioni di intensità sono state realizzate cambiando lo spessore del blocchetto trapezoidale e sono state realizzate diverse condizioni di carico cambiando la posizione in cui il provino è stato forgiato rispetto agli stampi.

Il materiale con cui sono stati realizzati i provini è l'alluminio.

In *Figura 5.15* vengono illustrati i provini utilizzati e lo schema dimensionale con la terminologia che è stata utilizzata.

Nella *Tabella 5.7* sono state invece riportate le dimensioni effettive dei provini utilizzati. Il valore dell'angolo α è stato fissato per tutti i provini pari a 45° .

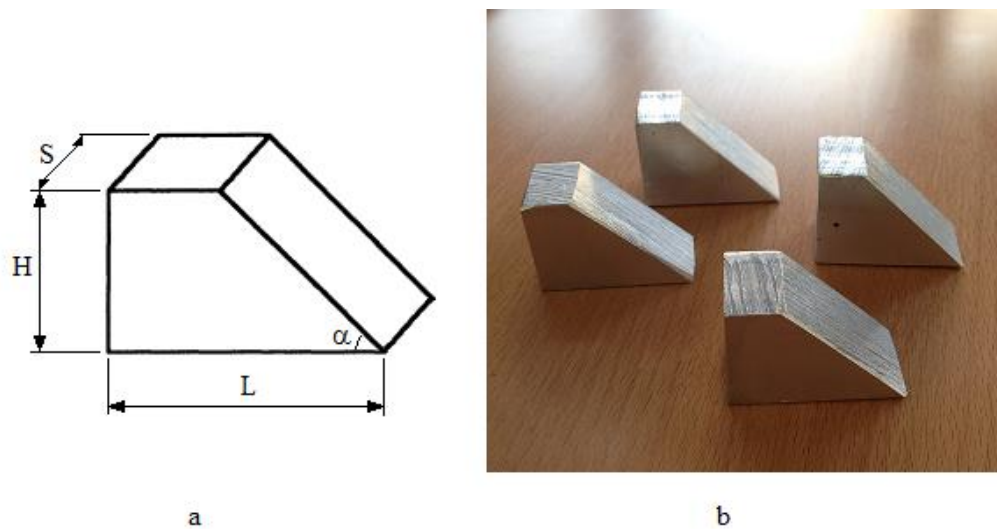


Figura 5.15 Geometria dei provini. a) Schema dimensionale. b) Esempi di provini utilizzati.

Tabella 5.7 Dimensioni dei provini.

	L [mm]	H [mm]	S [mm]
Provino 1	42	33	20
Provino 2	44	33	20
Provino 3	43	33	30
Provino 4	41	33	30
Provino 5	44	33	35
Provino 6	42	33	35
Provino 7	46	33	30
Provino 8	42	33	30

5.2.6 Campagna prove su pressa a vite

La seconda parte delle prove è stata svolta monitorando gli spostamenti dei due marker posti uno sullo stampo inferiore e l'altro sullo stampo superiore della pressa a vite Vaccari.

Il set-up del sistema è stato fatto riproducendo le condizioni di quello realizzato per le prove sulla MTS posizionando la telecamera nella stessa posizione ad una distanza di 600 mm dagli stampi.

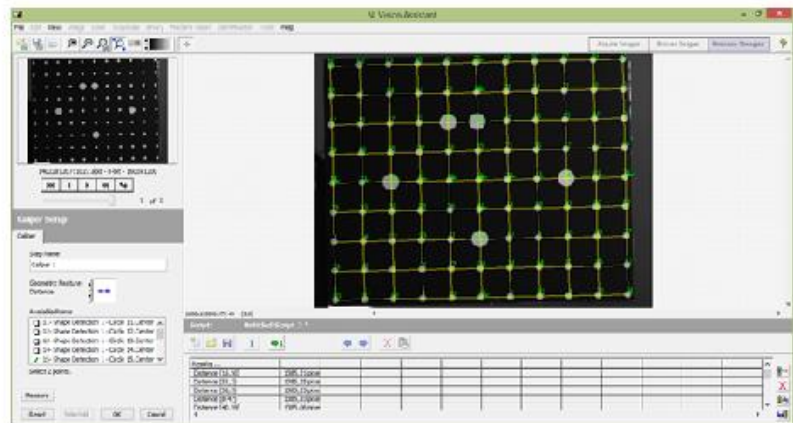
A questo punto è stata fatta la calibrazione dell'immagine sia per la correzione degli errori che per verificare la risoluzione dell'immagine, vedi *Figura 5.16*.

La calibrazione ha permesso anche di quantificare il disallineamento della telecamera con la direzione verticale trovando che questo non ha nessuna conseguenza sulla misura. Si è rilevato infatti che per uno spostamento di 90 mm in direzione verticale si ha uno spostamento orizzontale inferiore ai 0,020 mm. È stato scelto dunque di valutare lo spostamento orizzontale come differenza tra i valori di posizione orizzontale prima e dopo il contatto tra gli stampi. Anche nel caso di forgiatura del componente, nel quale si ha una corsa in deformazione inferiore ai 5 mm, il contributo del disallineamento risulta pressoché trascurabile in quanto inferiore di circa 70 volte del valore minimo di spostamento orizzontale misurato.

Le prove sono state condotte inizialmente con formato d'immagine 1600x120 in modo da avere la maggior frequenza di acquisizione delle immagini. Quando però il carico in direzione orizzontale è diventato tale da creare uno spostamento che ha fatto uscire il marker dal campo visivo ed è stato necessario passare al formato 1600x200.



a



b

Figura 5.16 Fase di calibrazione dell'immagine per le prove sulla pressa. a) Set-up per la calibrazione. b) Rilevamento delle caratteristiche geometriche della griglia calibrata.

Successivamente è stato valutato il rumore nel posizionamento dei marker dell'immagine causato dal funzionamento della pressa, in particolare dalle vibrazioni della macchina dovute alla rotazione dei volani. Questo è stato definito tramite misure statiche della posizione dei marker, l'acquisizione dei dati è stata eseguita per alcuni minuti per poi passare all'analisi statistica dei valori acquisiti. La prova è stata eseguita più volte con lo stampo superiore in posizioni diverse del campo di misura. Questo è stato fatto al fine di valutare eventuali differenze di rumore causate sia da vibrazioni diverse tra lo stampo superiore, posizionato più vicino ai volani, e lo stampo superiore, posizionato più vicino al

basamento; sia vibrazioni diverse per lo stampo superiore in funzione della sua posizione rispetto al campo di immagine.

Il rumore rilevato che è stato rilevato nei vari casi è rimasto costante e pari a $\pm 0,010$ mm.

Sono state svolte poi due campagne di prove:

1. Prove “a vuoto”.
2. Prove di deformazione.

Per prove “a vuoto” si intende delle prove in cui non è stato interposto alcun provino tra gli stampi, mentre nelle prove di deformazione c'è stata appunto la deformazione dei provini.

L'esecuzione del programma Find Template durante le prove è mostrata in *Figura 5.17*.

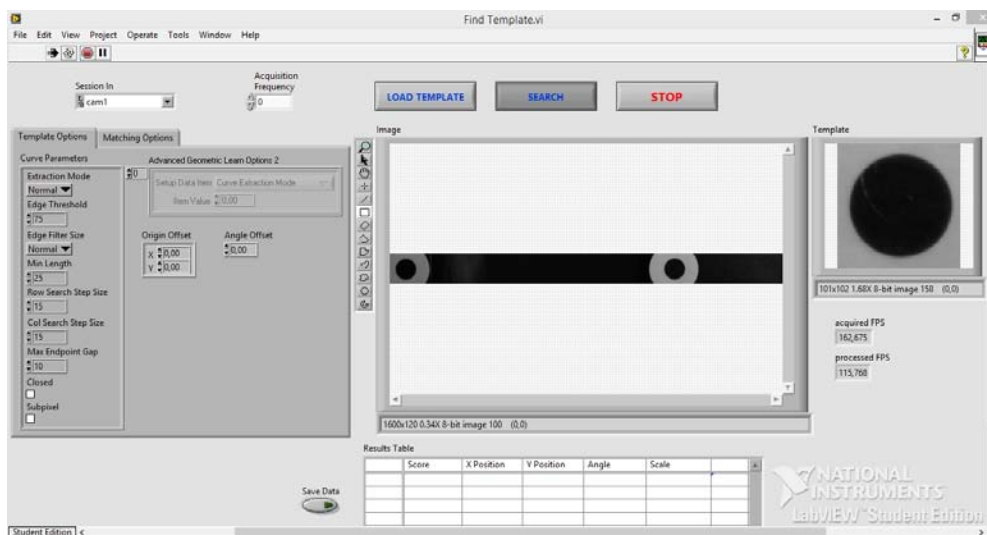


Figura 5.17 Esecuzione del programma Find Template per la localizzazione dei marker apposti sugli stampi. Si noti sulla destra il display con visualizzata la geometria modello da ricercare nelle immagini.

- Prove “a vuoto”

In queste prove è stato misurato lo spostamento orizzontale degli stampi causato dall'applicazione del carico in direzione verticale.

Questi spostamenti sono causati dalla non idealità delle superfici degli stampi e dal loro non perfetto parallelismo. È importante dunque poter conoscere le deflessioni laterali subite dalla pressa come effetto dell'applicazione di un carico verticale.

Lo mazza è stata fatta cadere per gravità a partire da quote diverse per variare l'intensità del carico. L'altezza di partenza dello stampo superiore è stata aumentata fino a raggiungere la quota di 180 mm per la quale si raggiunge la massima velocità di spostamento rilevabile dal sistema di visione.

Per ogni valore di quota iniziale della mazza sono state eseguite 3 prove.

I valori delle altezze di partenza esaminate sono: 60 / 90 / 120 / 150 / 180 mm

Dai dati degli spostamenti orizzontali è stato ottenuto un andamento lineare crescente in funzione dell'aumento del carico, comportamento caratteristico della elasticità della pressa.

Inoltre è stato possibile fare una valutazione dell'entità del gioco sulle guide della mazza che influenza il sistema pressa-stampo in questa condizione di carico.

- Prove di deformazione

In queste prove è stato invece misurato lo spostamento orizzontale dei marker applicando sia un carico verticale che uno orizzontale. Il carico verticale è stato mantenuto pressoché costante tra le prove tenendo fissa la quota di partenza della mazza a 180 mm, mentre il carico orizzontale, come detto sopra, è stato realizzato tramite la geometria del provino. Quest'ultimo è stato fatto variare di intensità cambiando lo spessore del componente forgiato ed è stato variato il verso di applicazione del carico ruotando di 180° il provino rispetto all'asse verticale.

Nelle figure successive vengono illustrate degli esempi di posizionamento dei provini e di deformazione degli stessi.

In *Figura 5.18* è mostrato il posizionamento del provino per la generazione di un carico verso sinistra in riferimento all'immagine. Si può vedere il provino prima e durante la prova.



Figura 5.18 Esempio di posizionamento a centro stampi e deformazione del provino.

Nella *Figura 5.19* si vede come il provino sia stato ruotato attorno all'asse verticale per generare un carico orizzontale in direzione opposta alla precedente, cioè verso destra.



Figura 5.19 Esempio di posizionamento a centro stampi del provino in posizione ruotata di 180° attorno all'asse verticale rispetto alla precedente e deformazione del provino.

Sono state eseguite anche delle prove posizionando i provini ai lati degli stampi per misurare gli spostamenti orizzontali anche nel caso della presenza di un momento tra gli stampi dovuto all'eccentricità del carico in direzione verticale, vedi *Figura 5.20*.

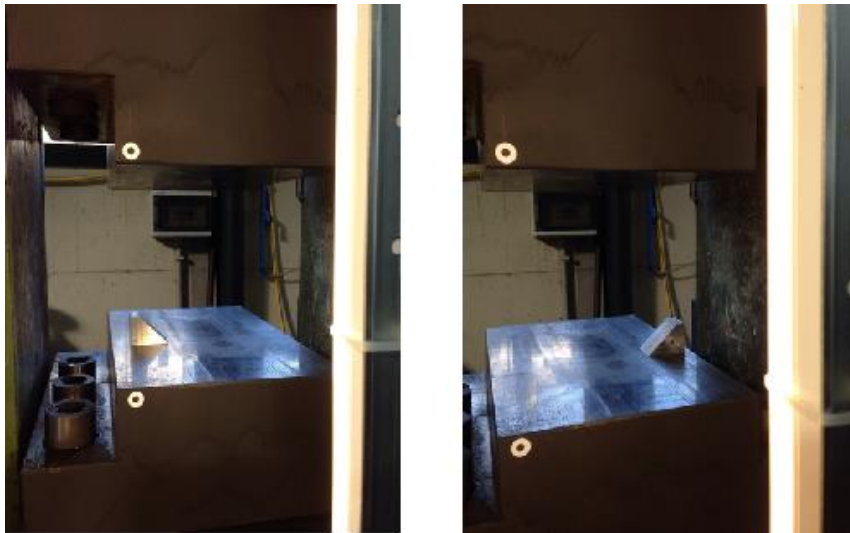


Figura 5.20 Posizionamenti dei provini ai bordi degli stampi.

In queste prove si è potuta determinare l'entità massima del gioco sulle guide della mazza nella direzione di applicazione del carico. È stato riscontrato una influenza diversa del gioco nei due versi considerati dovuta all'imperfezione geometrica delle guide e all'usura stessa che causano questa asimmetria appunto.

CAPITOLO 6

Analisi dei risultati

6.1 Risultati prove di piegatura della lamiera

Dopo l'acquisizione dei dati durante le prove sperimentali si è passati all'elaborazione degli stessi per la determinazione delle prestazioni del sistema di misura messo a punto.

L'elaborazione dei risultati è stata fatta in parallelo per entrambe le modalità di esecuzione del programma testate.

L'analisi statistica dei dati della taratura ha portato prima a stabilire le caratteristiche metrologiche e l'incertezza di misura relative alla misurazione dell'angolo di piega da parte del sistema.

Una volta disponibili questi risultati è stato possibile valutare le prestazioni del sistema di misura riguardo al calcolo del fattore di ritorno elastico tenendo in considerazione la propagazione dell'incertezza legata al fatto che questo viene ricavato tramite il rapporto tra i valori di angolo misurati dal sistema stesso.

6.1.1 Risultati della taratura e confronto

La prima caratteristica che è stata valutata in fase di taratura del sistema di misura è stata il rumore dell'immagine dal punto di vista della misura dell'angolo. L'influenza del rumore su questo valore è di tipo indiretto in quanto il rumore dell'immagine influenza il sistema nella localizzazione delle feature rettilinee e di conseguenza disturba la misura dell'angolo tra di esse.

La differenza di risoluzione tra le due modalità di prova porta dunque a comportamenti diversi del sistema di misura. Infatti nel caso di binning verticale pari a 2 si ha la somma dell'intensità luminosa

di due pixel del sensore adiacenti e quindi il valore di intensità del pixel risultante risente dell'influenza del rumore su entrambi gli elementi di origine.

In *Figura 6.1* è mostrato uno zoom dei risultati delle prove per l'acquisizione del rumore a piena risoluzione, mentre in *Figura 6.2* sono mostrati quelli a risoluzione verticale dimezzata.

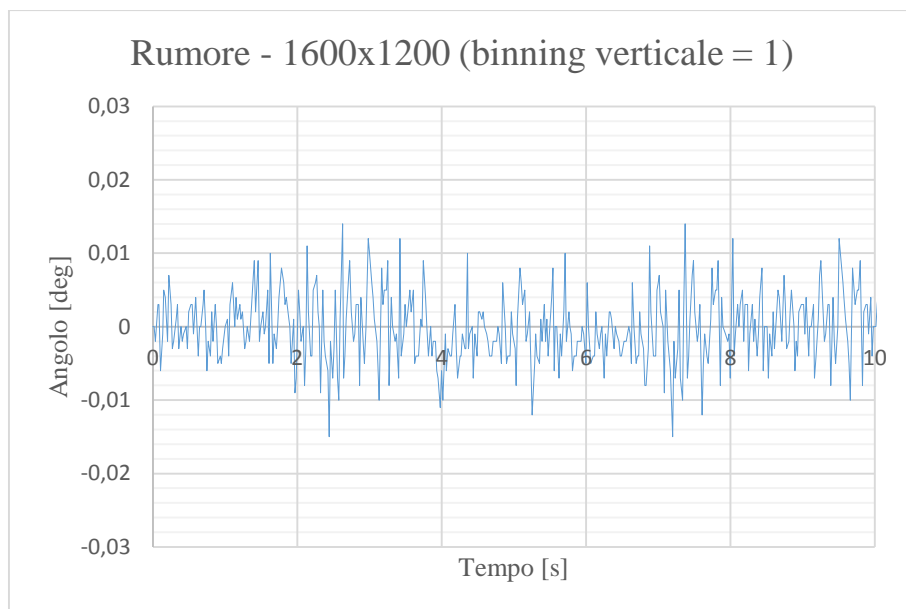


Figura 6.1 Rumore sulla misura dell'angolo a piena risoluzione.

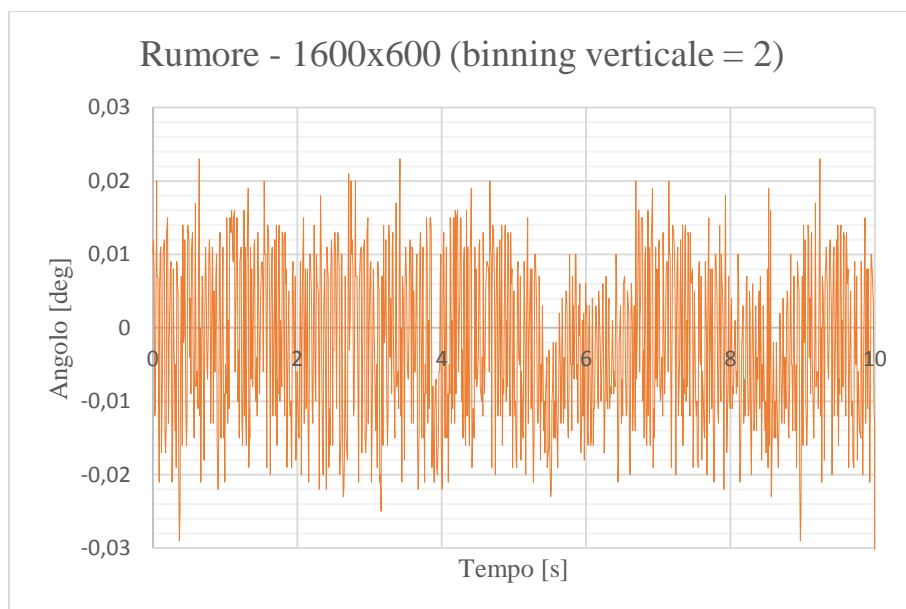


Figura 6.2 Rumore sulla misura dell'angolo a risoluzione verticale dimezzata.

Dai grafici si nota immediatamente la maggior densità di dati permessa dall'incremento del frame rate della telecamera.

A piena risoluzione dell'immagine il rumore ha un valore pari a $\pm 0,01^\circ$, come ci si attendeva, inferiore a quello a risoluzione verticale dimezzata che è pari a $\pm 0,02^\circ$.

L'effetto del rumore quasi doppio ottenuto nella seconda modalità di prova è stato quello che ha portato ad avere una maggiore dispersione dei risultati attorno al valore medio nelle prove di accuratezza. I risultati di queste prove mostrati in *Tabella 6.1* si riferiscono alla misurazione dell'angolo della squadra tarata secondo la normativa DIN 875/1.

Tabella 6.1 Risultati delle 24 misurazioni del campione in posizioni diverse nelle due modalità di prova.

Formato Immagine			
1600x1200		1600x600	
α [deg]		α [deg]	
89,98	90,01	90,03	90,01
90,00	90,01	89,99	90,01
89,99	90,00	90,01	90,00
90,00	89,99	90,01	90,00
90,00	90,01	90,00	90,03
89,98	90,00	90,03	90,00
89,99	89,98	89,97	89,97
90,00	90,01	89,99	90,01
89,99	89,99	89,98	89,99
89,99	90,00	89,97	90,00
90,00	90,00	90,00	90,00
90,00	90,01	90,00	90,01
Media		Media	
90,00		90,00	
Dev. Std.		Dev. Std.	
0,0095		0,0171	

In entrambi i casi si è ottenuta una distribuzione dei dati che si può ritenere gaussiana. La verifica è stata fatta applicando il test del chi-quadro.

Con binning verticale pari a 1 la distribuzione gaussiana trovata è leggermente asimmetrica nella parte sinistra della campana. Questo è causato dal fatto che tutti i risultati delle misure in questa modalità cadono in un intervallo molto ristretto di valori e il sistema restituisce risultati con variazioni di $0,01^\circ$ tra loro a causa della sua risoluzione di misura.

La distribuzione ottenuta è mostrata in *Figura 6.3*.

La curva ottenuta con binning verticale pari a 2 si avvicina di più alla distribuzione gaussiana e ha una dispersione di dati maggiori del caso precedente che la portano ad avere una forma più allargata.

Questa distribuzione invece è riportata in *Figura 6.4*.

Oltre alle curve di frequenza percentuale, nei due casi, vengono riportate anche le rispettive curve di frequenza cumulata.

Da queste misure è stata valutata anche la caratteristica di ripetibilità del sistema di misura.

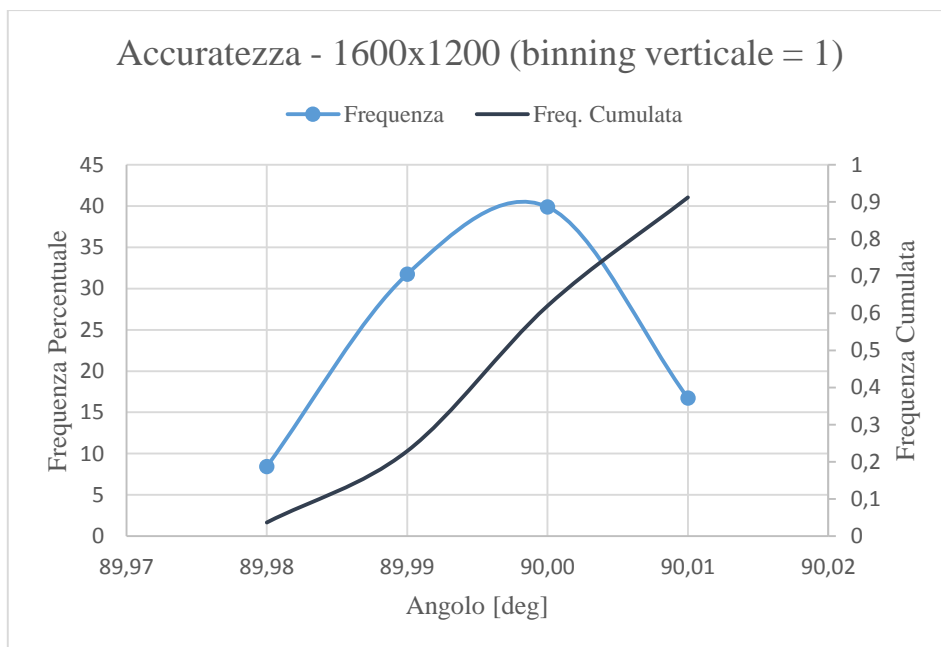


Figura 6.3 Funzione di distribuzione di frequenza percentuale e cumulata dei risultati delle misure sulla squadra tarata DIN 875/1 a piena risoluzione.

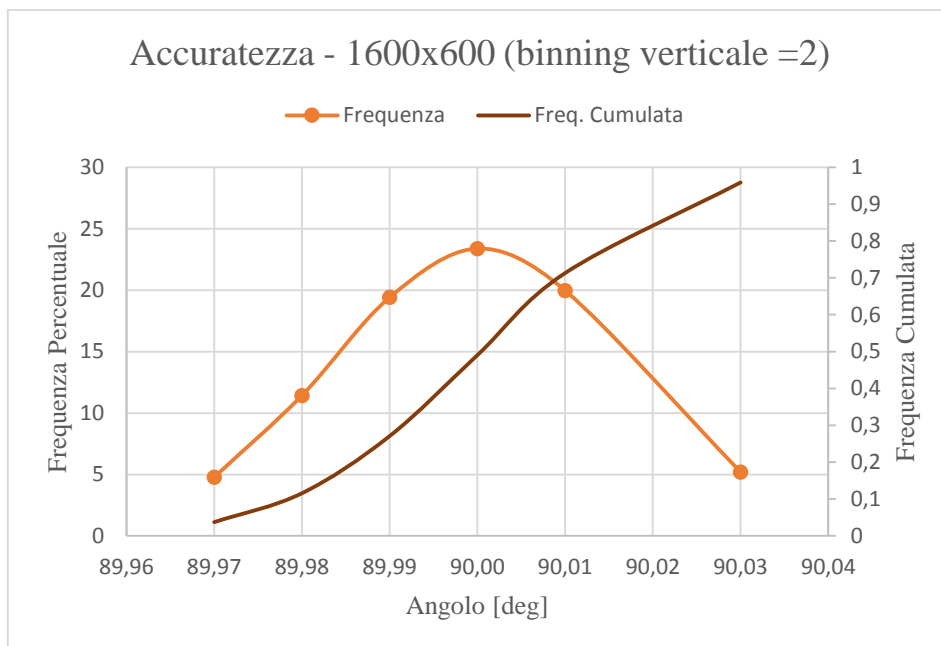


Figura 6.4 Funzione di distribuzione di frequenza percentuale e cumulata dei risultati delle misure sulla squadra tarata DIN 875/1 a risoluzione verticale dimezzata.

Vengono di seguito illustrati i dati acquisiti nelle prove di sensibilità del sistema. Si noti, all'aumentare della velocità del pistone, la miglior rappresentatività e la maggior densità di punti nella fase di transitorio ottenuta incrementando il frame rate della telecamera.

- **Prova 1:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 1 mm/s

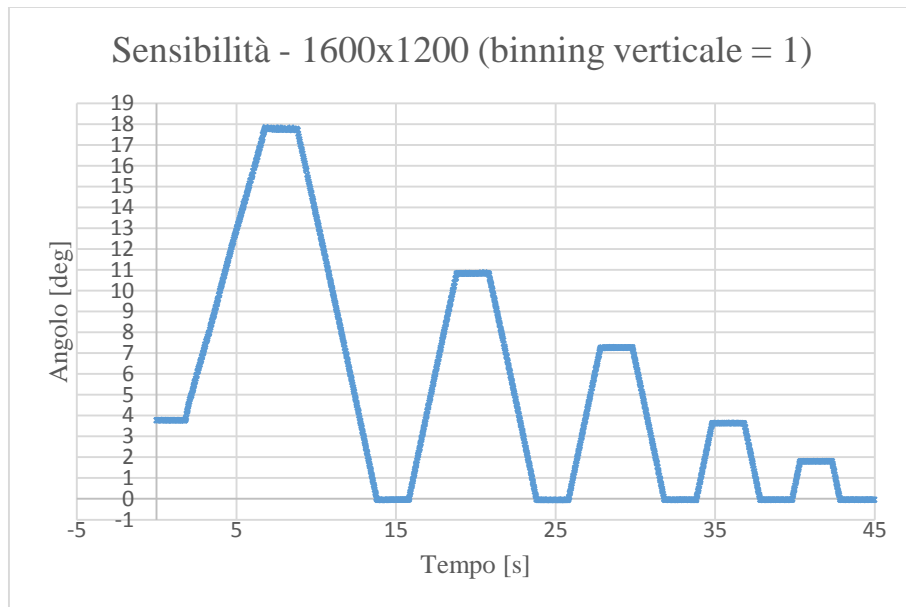


Figura 6.5 Curva prova 1 di sensibilità a piena risoluzione.

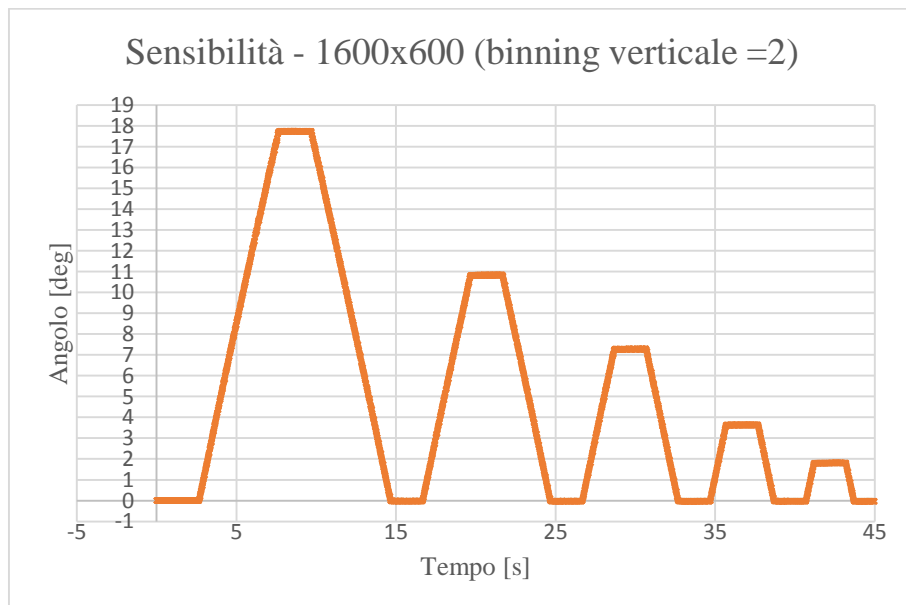


Figura 6.6 Curva prova 1 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- **Prova 2:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 3 mm/s

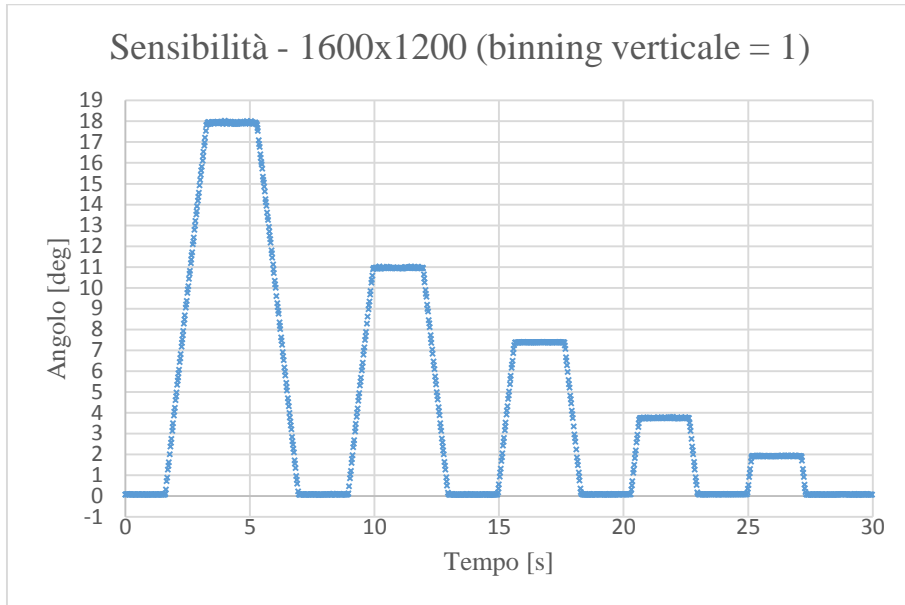


Figura 6.7 Curva prova 2 di sensibilità a piena risoluzione.

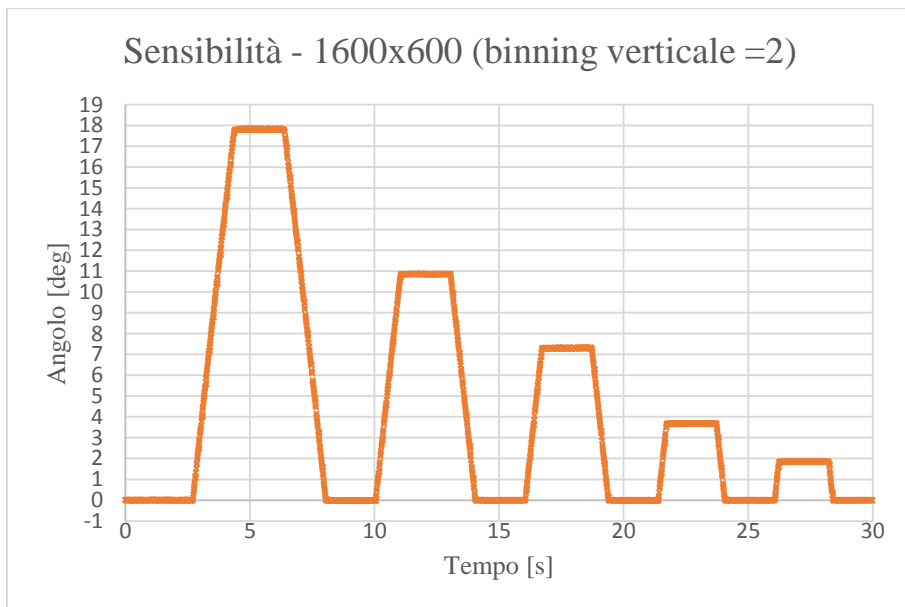


Figura 6.8 Curva prova 2 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- **Prova 3:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 10 mm/s

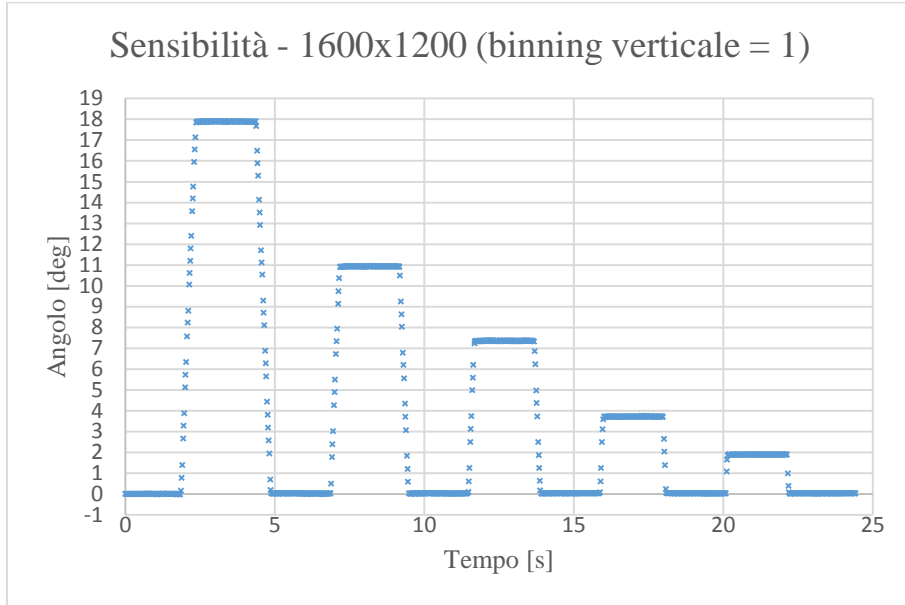


Figura 6.9 Curva prova 3 di sensibilità a piena risoluzione.

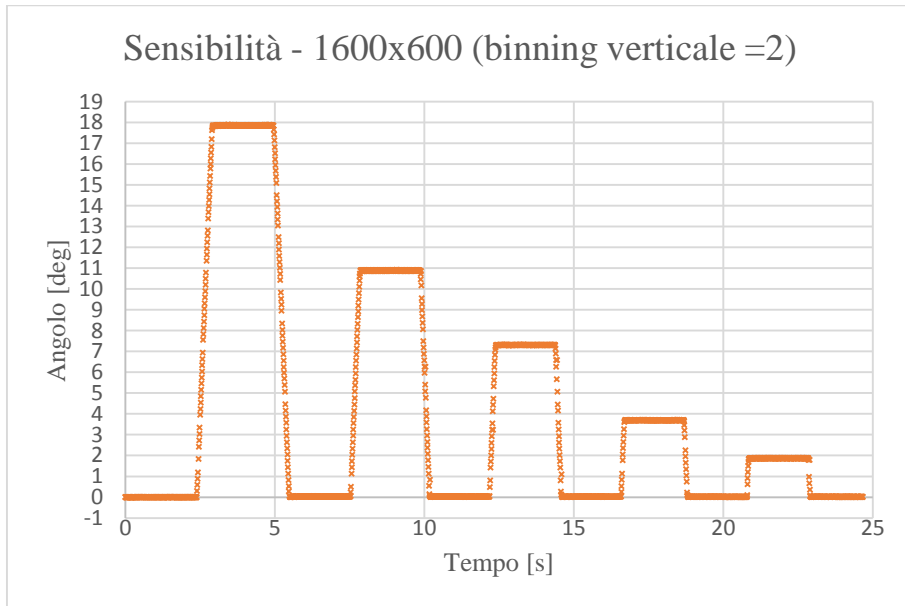


Figura 6.10 Curva prova 3 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- **Prova 4:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 15 mm/s

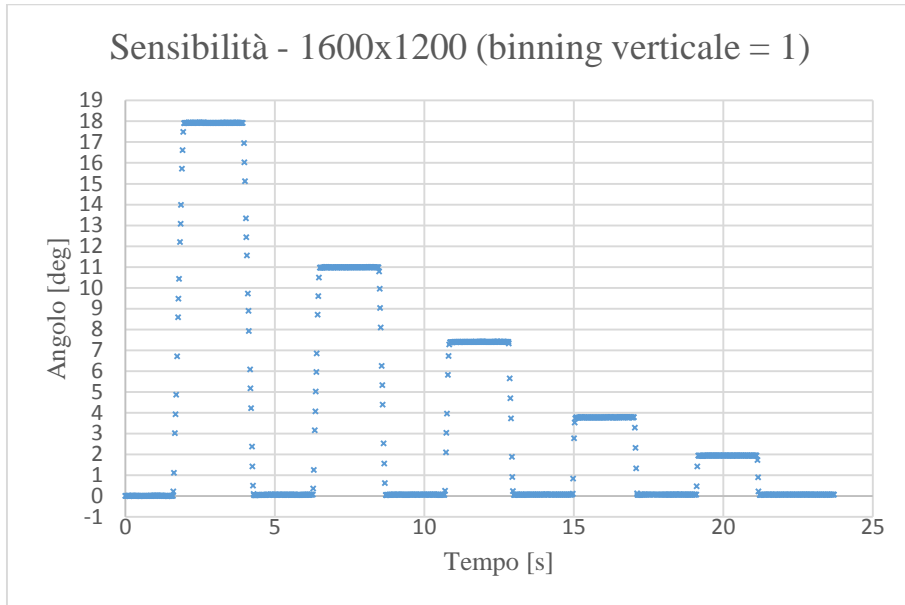


Figura 6.11 Curva prova 4 di sensibilità a piena risoluzione.

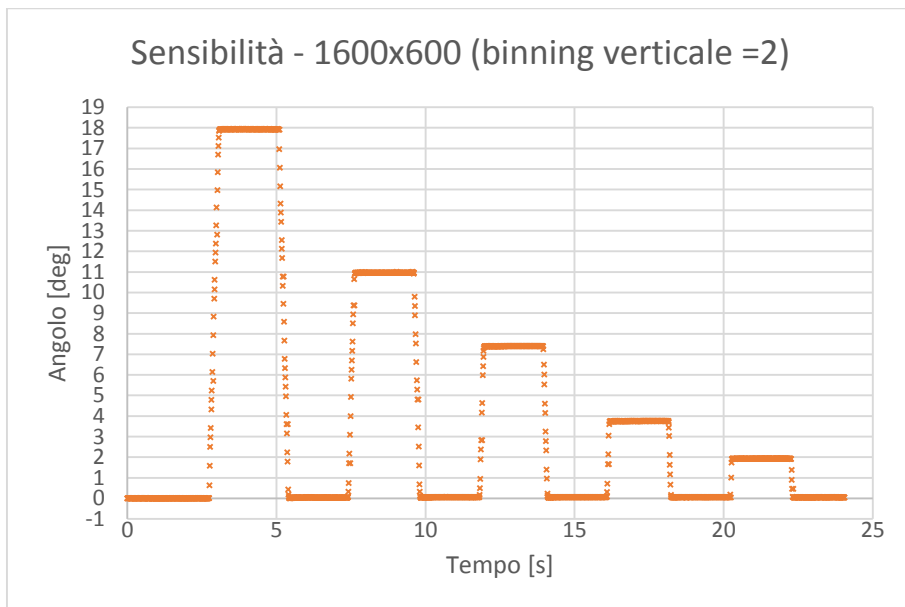


Figura 6.12 Curva prova 4 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- **Prova 5:** Corse: 5 / 2 / 1 / 0,5 mm
Velocità pistone: 20 mm/s

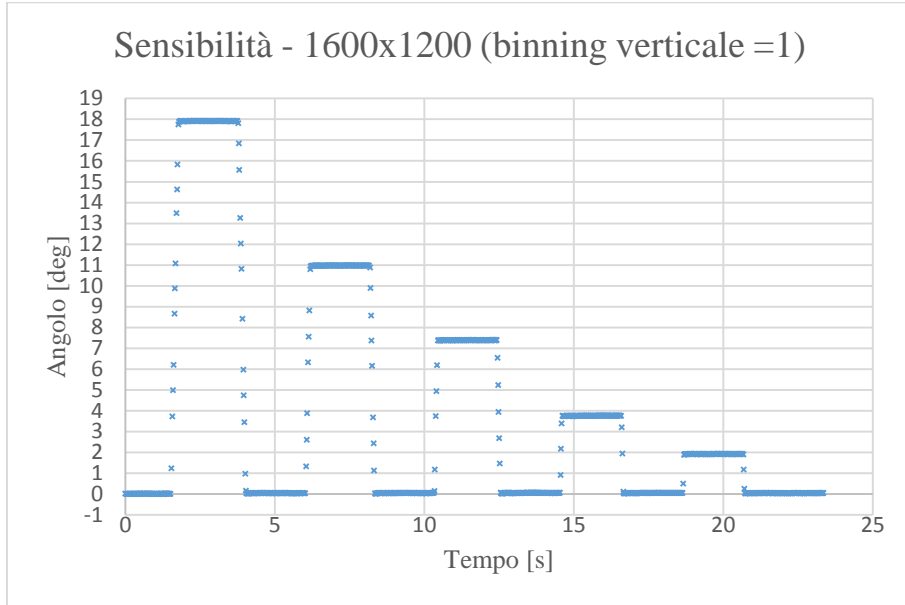


Figura 6.13 Curva prova 5 di sensibilità a piena risoluzione.

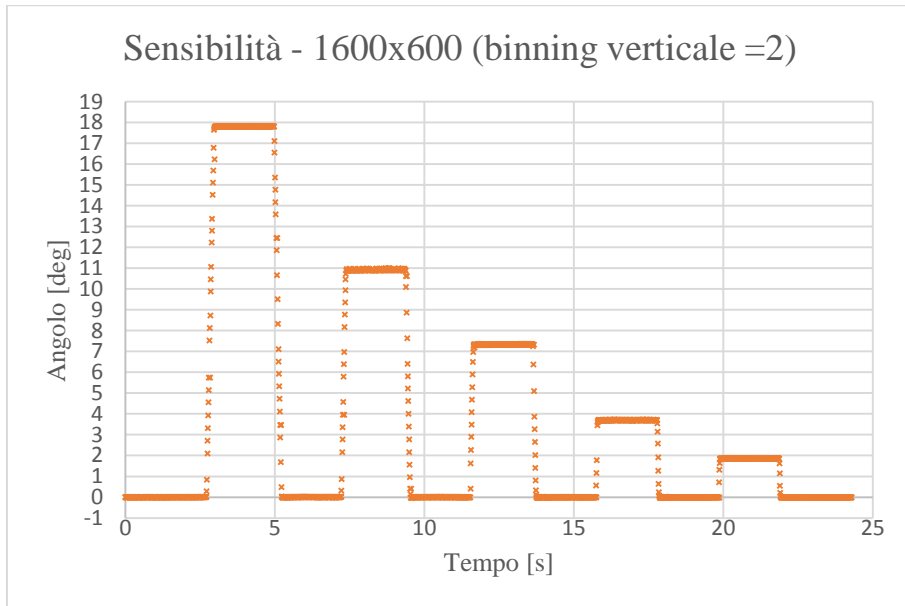


Figura 6.14 Curva prova 5 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- **Prova 6:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 / 0,005 mm
Velocità pistone: 0,5 mm/s

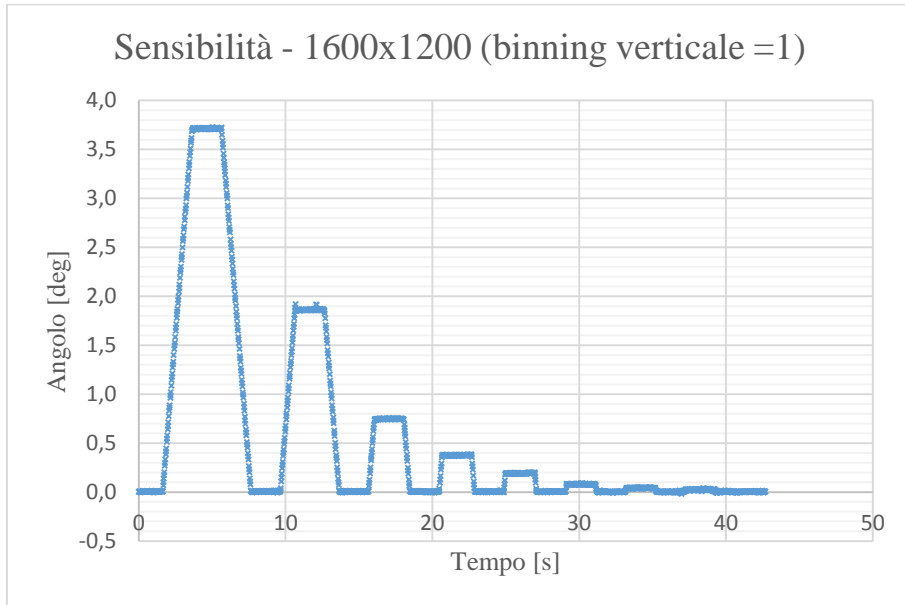


Figura 6.15 Curva prova 6 di sensibilità a piena risoluzione.

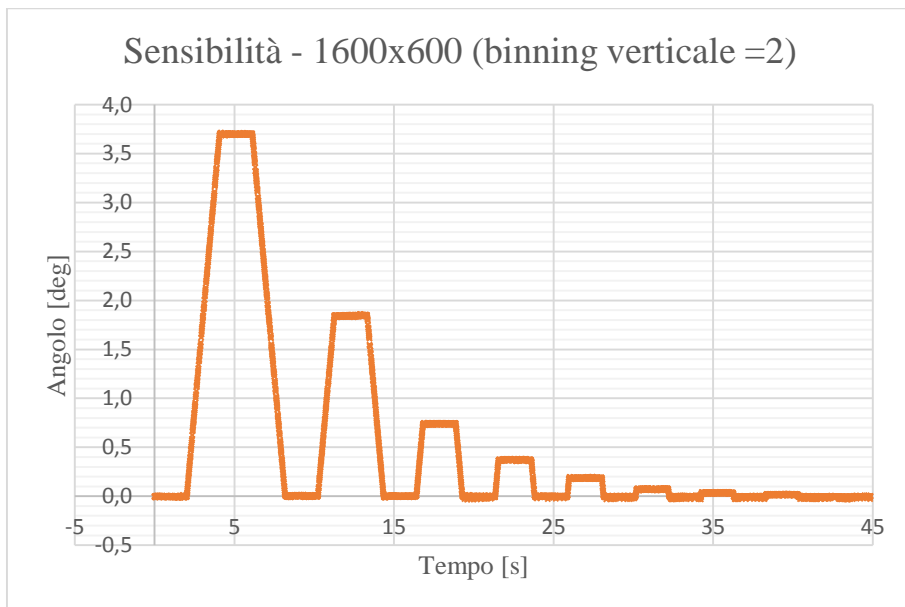


Figura 6.16 Curva prova 6 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

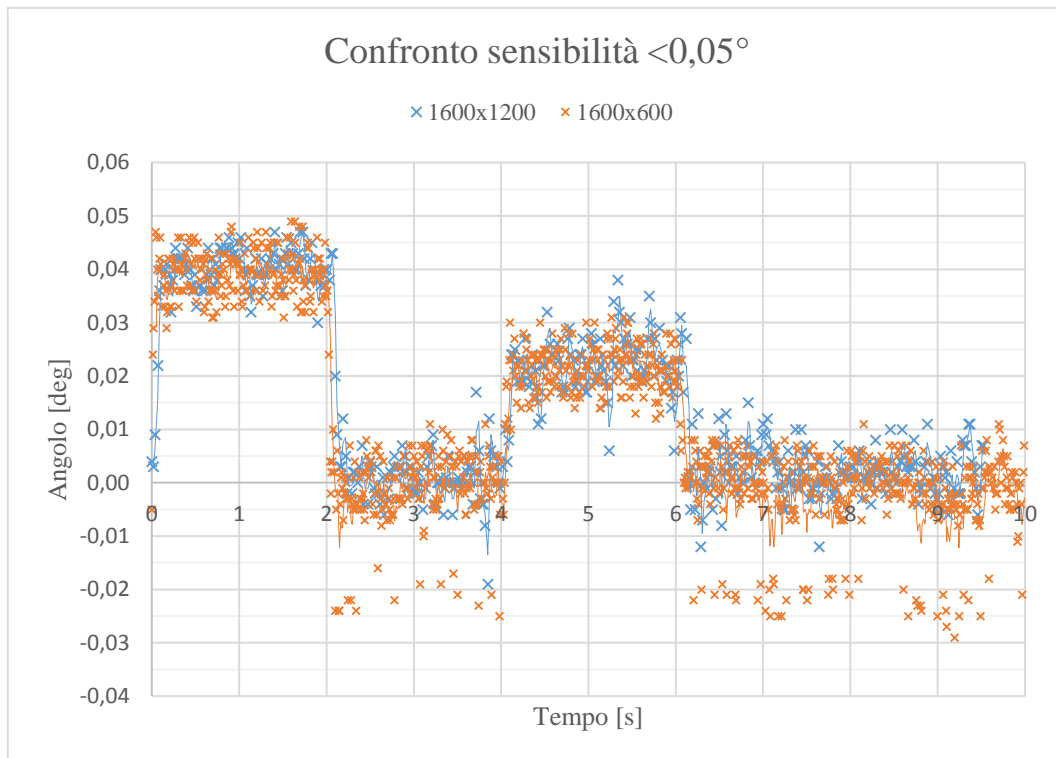


Figura 6.17 Confronto tra le sensibilità alle variazioni angolari inferiori a $0,05^\circ$ nelle due modalità riferite alla prova 6.

In *Figura 6.17* si può vedere lo zoom dei dati della prova di sensibilità numero 6 relativo al tratto in cui si sono imposte variazioni angolari inferiori a $0,05^\circ$.

Si può chiaramente notare che in entrambe le modalità la sensibilità del sistema di misura rilevata è la stessa ed è pari a $0,02^\circ$. Variazioni inferiori, cioè quelle di un centesimo di grado, non si riescono a distinguere chiaramente in quanto le dispersioni dei dati, causate dal rumore, si vanno a sovrapporre impedendo una lettura chiara ed inequivocabile della misura della variazione.

Si noti però che la presenza di un valore di rumore maggiore per la modalità di acquisizione con binning verticale pari a 2 porta ad avere una maggiore dispersione delle misure attorno al valore medio.

Con riferimento alle prove precedenti, invece, si può vedere come all'aumentare della velocità del pistone il sistema individua sempre meno punti. Questo comportamento, come viene evidenziato dai grafici seguenti, diventa sempre più critico al diminuire della variazione angolare per la quale si arriva addirittura a non riuscire a rilevare dati nella fase di transitorio.

In generale, inoltre, dalle prove è emerso uno scostamento di tipo sistematico tra le misure a piena risoluzione e quelle a risoluzione verticale dimezzata di $0,01^\circ$ che può facilmente essere eliminato tramite un'opportuna traslazione dei valori.

- **Prova 7:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
Velocità pistone: 1 mm/s

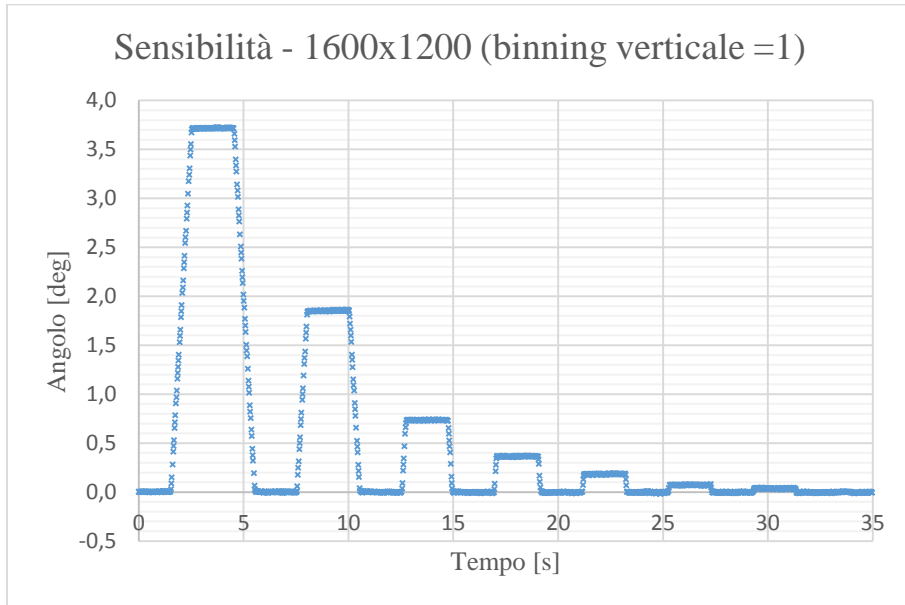


Figura 6.18 Curva prova 7 di sensibilità a piena risoluzione.

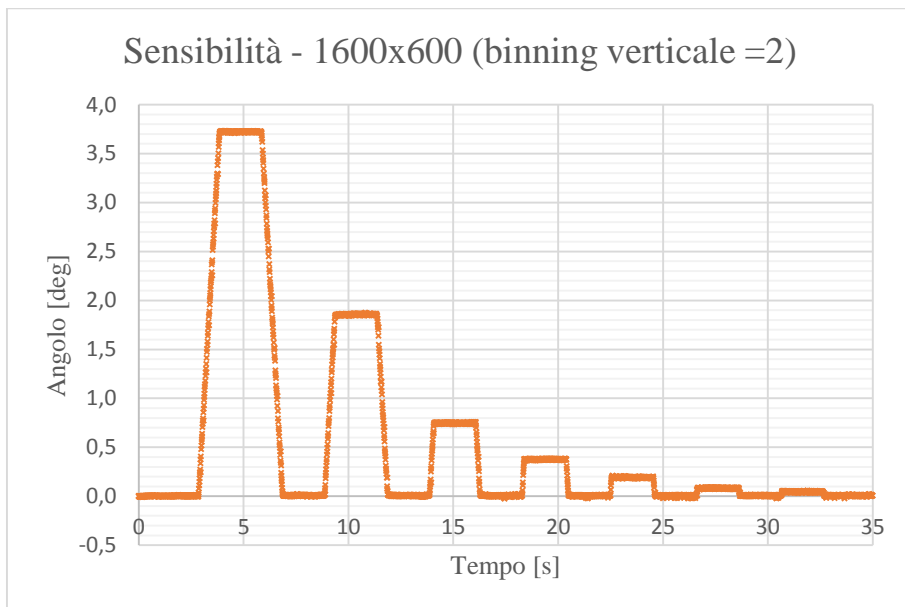


Figura 6.19 Curva prova 7 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- Prova 8:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
 Velocità pistone: 10 mm/s

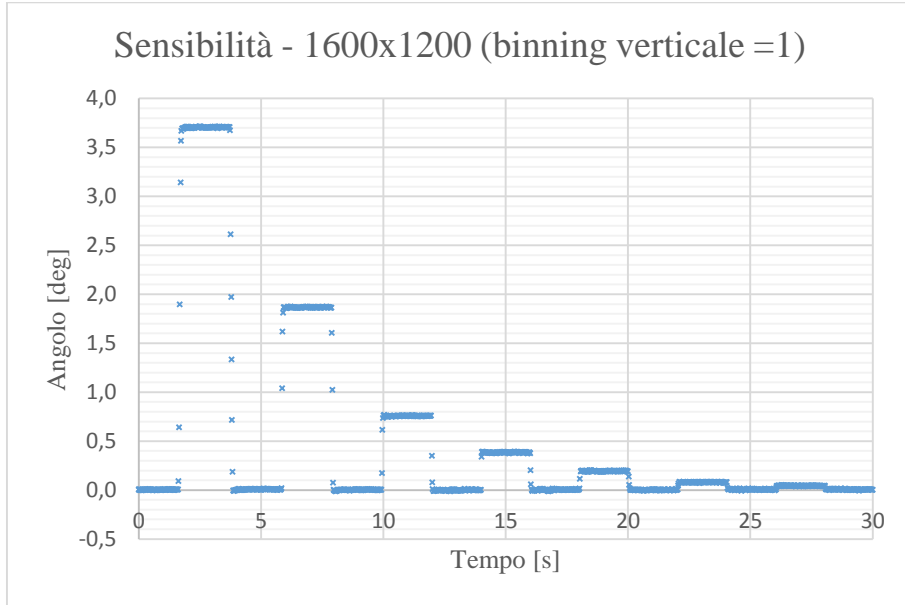


Figura 6.20 Curva prova 8 di sensibilità a piena risoluzione.

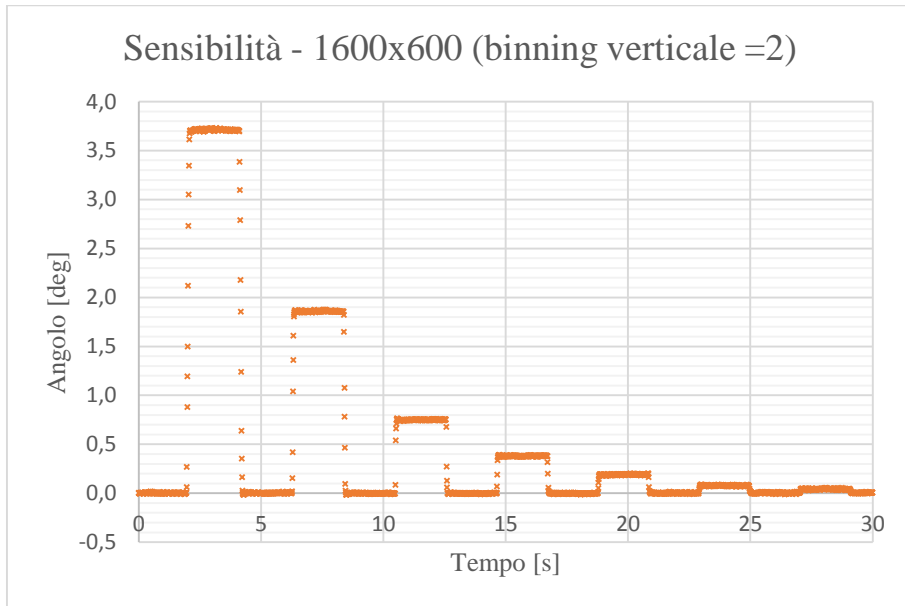


Figura 6.21 Curva prova 8 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- **Prova 9:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
Velocità pistone: 15 mm/s

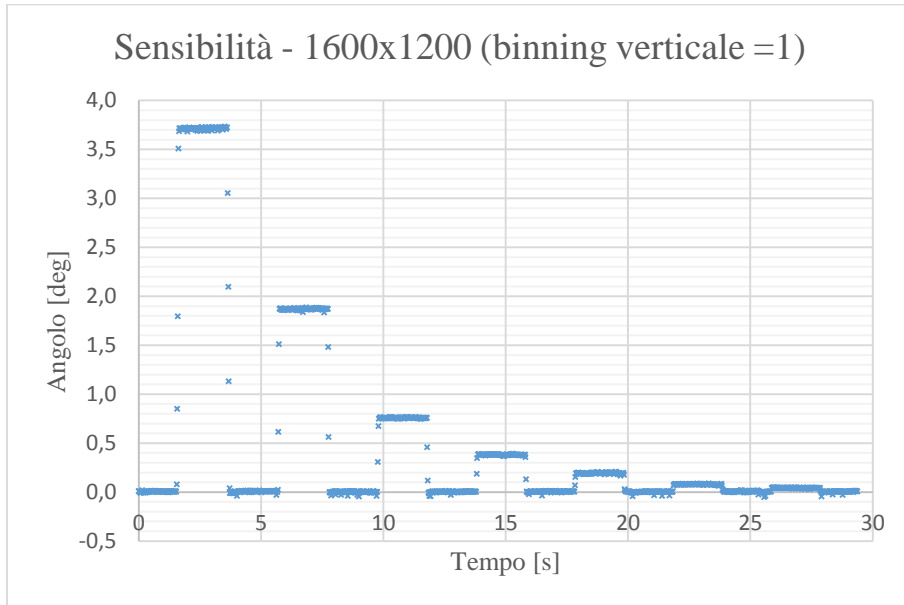


Figura 6.22 Curva prova 9 di sensibilità a piena risoluzione.

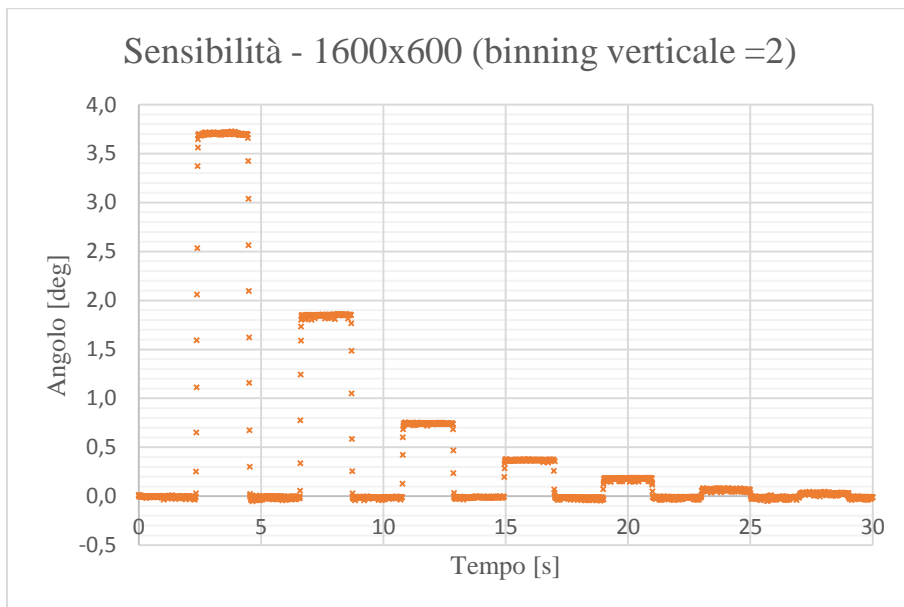


Figura 6.23 Curva prova 9 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

- Prova 10:** Corse: 1 / 0,5 / 0,2 / 0,1 / 0,05 / 0,02 / 0,01 mm
 Velocità pistone: 20 mm/s

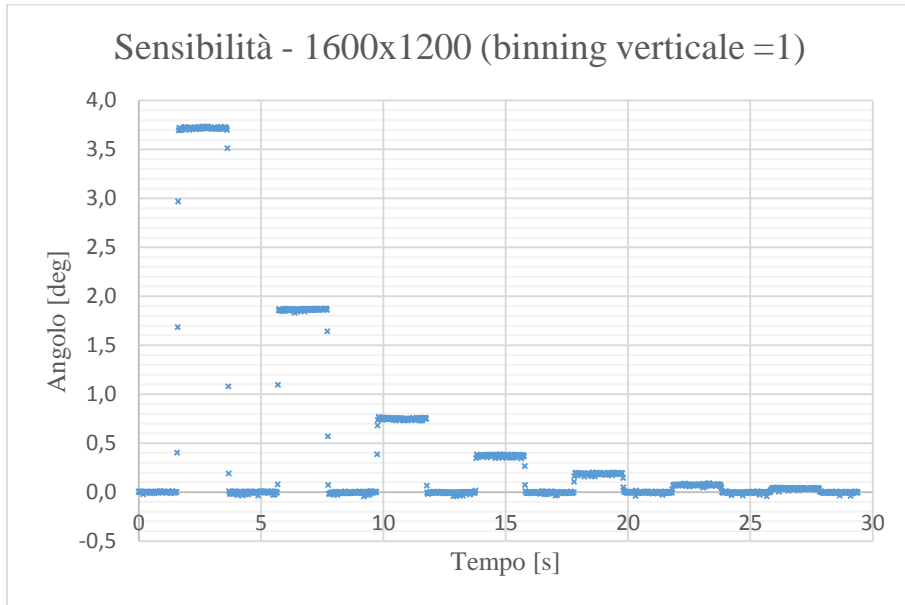


Figura 6.24 Curva prova 10 di sensibilità a piena risoluzione.

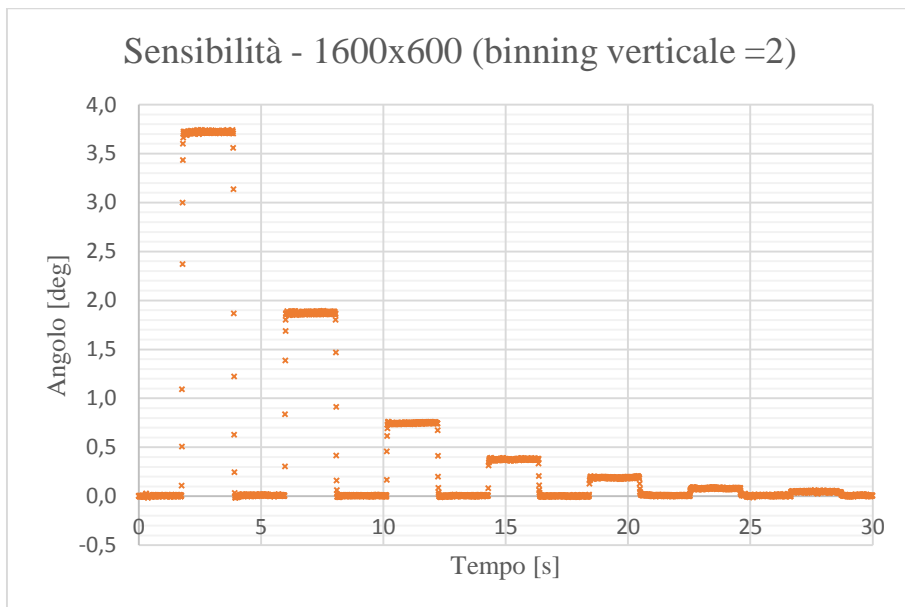


Figura 6.25 Curva prova 10 di sensibilità a risoluzione verticale dimezzata.

Terminate queste prove è stato possibile calcolare l'incertezza di misura del sistema di visione messo a punto nelle due modalità. I vari contributi e il risultato finale di incertezza estesa sono riepilogati in *Tabella 6.2*. Quest'ultima è stata calcolata con un fattore di copertura pari a 2 per avere un grado di confidenza del 95%.

Tabella 6.2 Contributi di incertezza ed incertezza estesa delle due modalità di prova esaminate.

	Formato 1600x1200 (binning verticale = 1)	Formato 1600x600 (binning verticale = 2)
Incertezza Rumore	$\pm 0,004^\circ$	$\pm 0,008^\circ$
Incertezza Ripetibilità	$\pm 0,002^\circ$	$\pm 0,004^\circ$
Incertezza Campione	$\pm 0,006^\circ$	$\pm 0,006^\circ$
Incertezza Sensibilità	$\pm 0,006^\circ$	$\pm 0,006^\circ$
Incertezza Estesa (P=95%)	$\pm 0,02^\circ$	$\pm 0,03^\circ$

Come si può vedere il fattore di maggior rilievo che fa distinguere le misure eseguite nelle due modalità è il rumore dell'immagine, che comporta anche la maggior incertezza di ripetibilità nel caso in cui si opera con risoluzione verticale dimezzata.

In ogni caso la precisione del sistema di misura si ritiene molto soddisfacente per entrambe le configurazioni. Gli attuali sistemi di controllo sugli angoli di piegatura arrivano infatti a garantire accuratezze del decimo di grado, quindi anche se nel caso operativo effettivo venissero introdotti altri disturbi, come ad esempio vibrazioni della macchina piegatrice, il sistema riuscirebbe a fornire ancora per un ampio range dati di ottima qualità per il controllo dei feedback.

La riduzione della risoluzione causa in definitiva un calo prestazionale del sistema che, vista la precisione comunque ottenuta, si ritiene accettabile a fronte dell'incremento di frame rate ottenuto.

6.1.2 Presentazione dei risultati del calcolo del fattore di ritorno elastico K

Il fattore di ritorno elastico K è stato calcolato dal programma Angle Measure come rapporto tra il valore misurato dell'angolo di piega dopo la rimozione del carico e il valore misurato dell'angolo imposto tramite il punzone. Essendo dunque ottenuto come rapporto tra due misure caratterizzate dalla stessa incertezza di misura è stata valutata la propagazione di incertezza che ne deriva per le due modalità di prova esaminate.

Le prove sono state svolte su due tipi di lamierini diversi per geometria e materiale.

In *Tabella 6.3* sono riportati i risultati delle prove sui provini di lamiera in AA 5083 e nella *Figura 6.26* il confronto tra le relative distribuzioni di frequenza ottenute nella modalità a piena risoluzione e in quella a risoluzione verticale dimezzata.

Tabella 6.3 Risultati prove lamierini in AA 5083.

Formato Immagine					
1600x1200			1600x600		
α_i [deg]	α_r [deg]	K	α_i [deg]	α_r [deg]	K
75,25	51,88	0,689	75,07	51,77	0,690
74,61	51,68	0,693	73,80	51,65	0,700
74,15	51,76	0,698	74,24	51,68	0,696
73,48	51,03	0,694	73,58	50,97	0,693
74,02	51,38	0,694	74,07	51,32	0,693
74,11	51,44	0,694	74,18	51,7	0,697
74,04	51,53	0,696	74,09	51,49	0,695
74,26	51,71	0,696	74,30	51,88	0,698
74,12	51,49	0,695	74,16	51,51	0,695
75,15	51,56	0,686	75,08	51,67	0,688
K_{medio}			K_{medio}		
0,694			0,695		
Dev. Std.			Dev. Std.		
0,0035			0,0036		

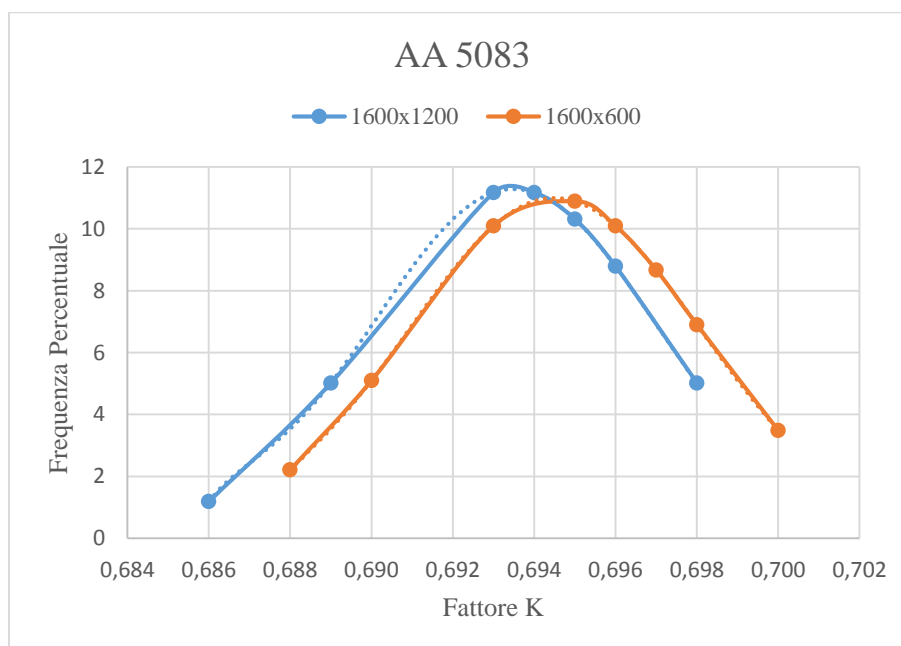


Figura 6.26 Confronto tra le funzioni di distribuzione di frequenza delle prove sui lamierini in AA 5083.

In *Tabella 6.4* sono invece riportati i risultati delle prove sui lamierini in AA 6016 e nella *Figura 6.27* il confronto tra le relative distribuzioni di frequenza ottenute nelle due modalità di prova.

Tabella 6.4 Risultati prove lamierini in AA 6016.

Formato Immagine					
1600x1200			1600x600		
α_i [deg]	α_r [deg]	K	α_i [deg]	α_r [deg]	K
60,54	39,84	0,658	60,50	39,78	0,658
60,77	40,08	0,660	60,78	40,09	0,660
60,81	40,03	0,658	60,80	39,97	0,657
61,06	40,22	0,659	61,13	40,00	0,654
60,79	39,76	0,654	60,91	39,72	0,652
73,91	48,53	0,657	73,93	48,61	0,658
60,71	39,89	0,657	60,70	39,87	0,657
61,02	40,29	0,660	61,04	40,29	0,660
60,70	39,98	0,659	60,84	39,99	0,657
60,89	40,01	0,657	60,91	40,05	0,658
K_{medio}			K_{medio}		
0,658			0,657		
Dev. Std.			Dev. Std.		
0,0018			0,0025		

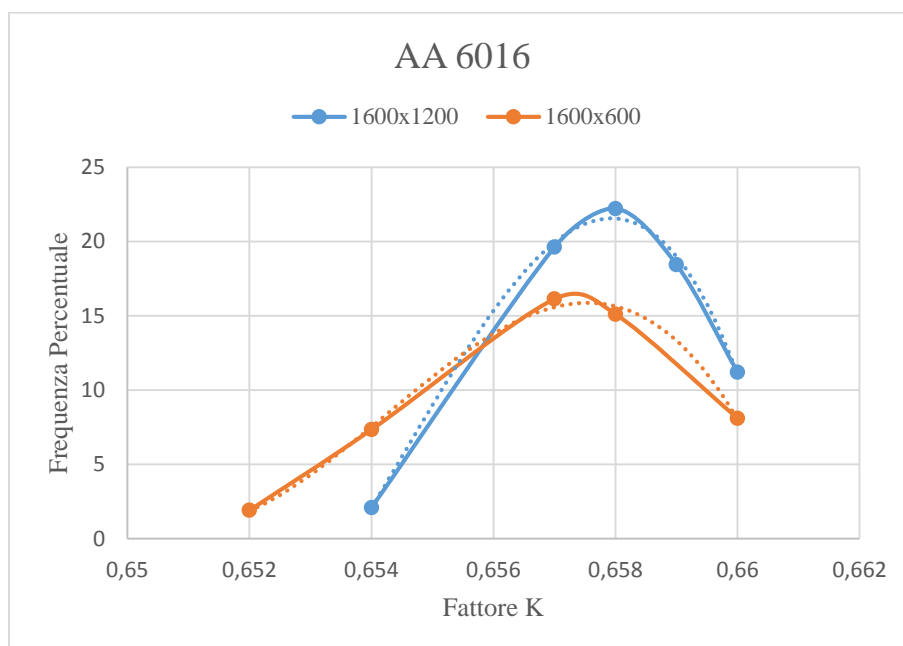


Figura 6.27 Confronto tra le funzioni di distribuzione di frequenza delle prove sui lamierini in AA 6016.

I risultati ottenuti per ogni campagna prove sono compatibili in entrambe le modalità di acquisizione. Come ci si aspettava, la distribuzione dei valori calcolati con risoluzione verticale dell'immagine ridotta hanno dato luogo ad una distribuzione dei risultati con valore medio leggermente scostato da quello ottenuto con i valori calcolati a piena risoluzione a causa appunto della propagazione dell'incertezza. Ci si aspettava anche di ottenere una deviazione standard maggiore con binning verticale pari a 2. Ciò si è verificato solo con i provini di lamiera in AA 6016 mentre nel caso dei lamierini in AA 5083 la deviazione standard è pressoché invariata.

Per quanto riguarda i valori medi di K la differenza tra i valori calcolati nelle due modalità è dell'ordine di 10^{-3} e quindi di entità molto contenuta.

Il sistema mostra dunque un'ottima costanza nelle prestazioni sia a piena risoluzione che a risoluzione verticale dimezzata.

6.2 Risultati prove dello spostamento relativo dei marker

Dopo l'esecuzione delle prove sulla MTS è stato possibile, tramite l'elaborazione dei dati ricavati, determinare le prestazioni del sistema di misura messo a punto.

In questo caso le caratteristiche metrologiche del sistema rimangono invariate per le varie configurazioni esaminate in quanto la risoluzione dell'immagine non viene cambiata, l'unica differenza è legata alla diversa frequenza di acquisizione delle immagini.

Dall'analisi statistica dei dati ricavati dalla taratura è stato possibile stabilire anche l'incertezza di misura sugli spostamenti del sistema.

Si è passati poi all'elaborazione dei dati ricavati dalla campagna prove sulla pressa a vite che ha permesso di ricostruire il comportamento elastico della macchina in dipendenza all'applicazione di soli carichi verticali o di carichi verticali e carichi orizzontali contemporaneamente.

6.2.1 Presentazione risultati delle prove su MTS

Innanzitutto è stata calcolata l'influenza del rumore dell'immagine sulla determinazione della posizione del marker all'interno del campo visivo. Come si può vedere in *Figura 6.28* il rumore rilevato è di $\pm 0,002$ mm.

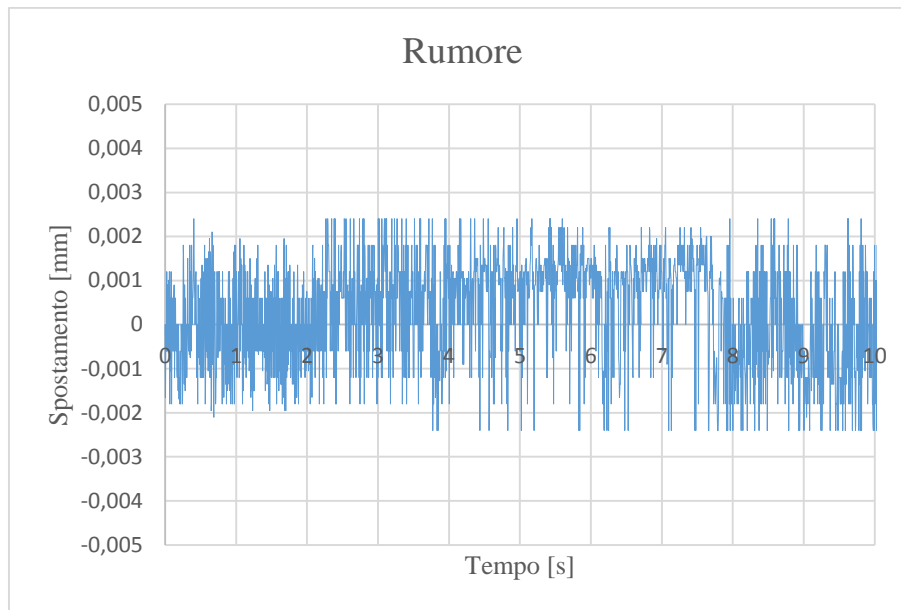


Figura 6.28 Rumore sulla rilevazione della posizione del marker.

Vengono riportati in *Tabella 6.5* i risultati delle prove di accuratezza per il calcolo della ripetibilità sulle misurazioni degli spostamenti.

I tre valori di spostamento scelti per questo prove sono stati: 1 mm, 0,5 mm e 0,1 mm.

Ognuno di questi è stato realizzato e misurato 25 volte in varie posizioni all'interno del campo visivo per valutare anche possibili variazioni di prestazioni nell'esecuzione della misura in zone diverse dell'immagine.

In tutti e tre i casi i risultati delle misure hanno dato luogo ad una distribuzione dei dati di tipo gaussiano. La verifica è stata fatta in questo caso usando il metodo basato sull'uso del grafico di probabilità normale (GPN). Questa tecnica consente una veloce valutazione qualitativa di quanto la distribuzione in esame si discosta da quella gaussiana.

Si noti che sarà fondamentale tenere in considerazione la precisione negli spostamenti della macchina di carico MTS.

Tutti e tre gli spostamenti sono stati misurati in modo accurato dal sistema.

In *Figura 6.29* viene riportata la funzione distribuzione di frequenza percentuale e cumulata delle misure dello spostamento di 0,1 mm.

Tabella 6.5 Risultati delle prove di accuratezza della misura degli spostamenti.

Spostamento 1 [mm]	Spostamento 0,5 [mm]	Spostamento 0,1 [mm]
0,999	0,500	0,010
1,001	0,499	0,009
0,999	0,499	0,009
1,001	0,496	0,011
0,999	0,501	0,010
1,001	0,498	0,009
0,998	0,502	0,009
1,000	0,498	0,010
0,999	0,501	0,010
1,000	0,499	0,010
0,999	0,503	0,009
1,000	0,503	0,010
1,000	0,503	0,012
0,999	0,503	0,010
1,001	0,503	0,011
1,000	0,502	0,011
1,001	0,502	0,010
1,000	0,502	0,009
1,001	0,502	0,010
0,999	0,500	0,008
1,002	0,500	0,010
0,999	0,502	0,009
1,002	0,500	0,010
0,999	0,502	0,010
1,001	0,502	0,010
Media [mm]	Media [mm]	Media [mm]
1,000	0,501	0,010
Dev. Std.	Dev. Std.	Dev. Std.
0,00105	0,00192	0,00082

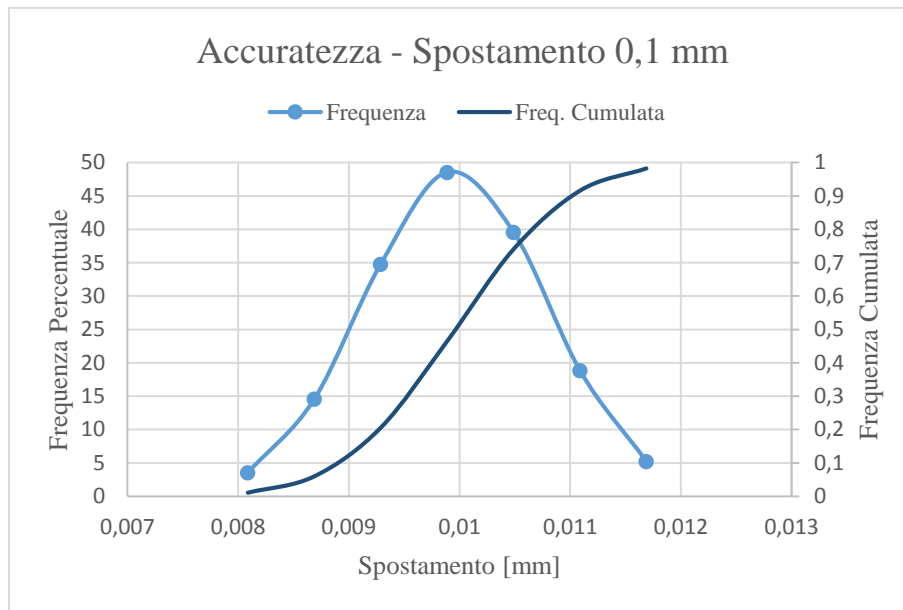


Figura 6.29 Funzione di distribuzione di frequenza percentuale e cumulata dei risultati delle misure dello spostamento di 0,1 mm.

Per quanto riguarda le prove di sensibilità viene illustrata a titolo esemplificativo solo una delle prove eseguite. Si farà riferimento alla prova numero 6 svolta con formato di immagine 1600x120 pixel. In *Figura 6.30* è mostrato il ciclo di prova completo. Si noti dal confronto con i dati ottenuti dal sistema di controllo della MTS che gli spostamenti imposti e quelli misurati dalla telecamera corrispondono.

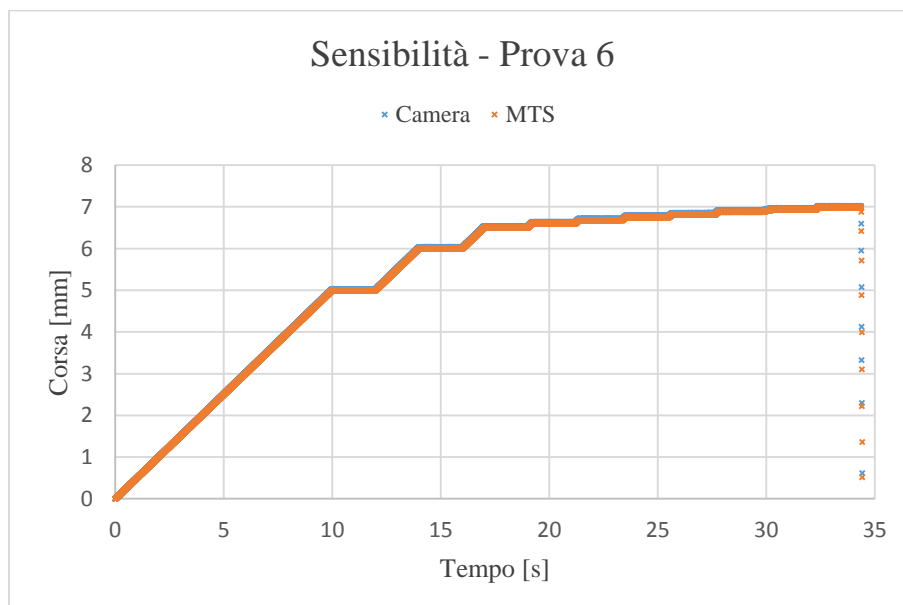


Figura 6.30 Ciclo delle prove di sensibilità. Prova 6.

In *Figura 6.31* viene invece mostrato uno zoom della stessa prova per evidenziare l'individuazione del più piccolo spostamento rilevabile dal sistema di misura per la determinazione della sensibilità.

Da qui si vede che il sistema è in grado di apprezzare spostamenti fino a 0,005 mm. Oltre questo valore il rumore nell'immagine impedisce di distinguere in maniera chiara i risultati delle misure di spostamento.

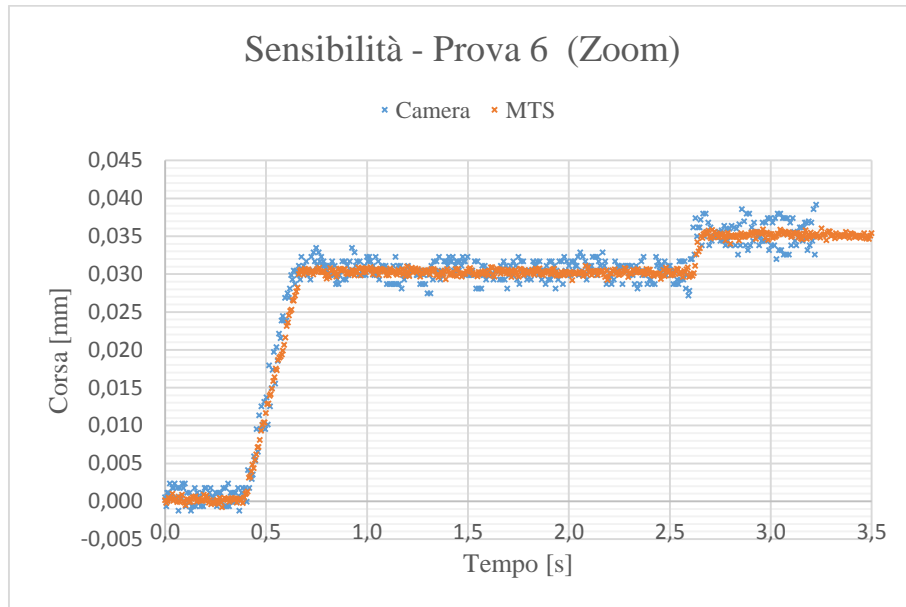


Figura 6.31 Ingrandimento della prova 6 di sensibilità.

Le ultime prove svolte sulla MTS sono state quelle che hanno portato alla definizione della velocità massima di spostamento del marker che può essere acquisita tramite il sistema di visione. Le prove sono state svolte solo nel formato d'immagine 1600x120 per avere la massima frequenza di acquisizione della telecamera. Queste prove sono state svolte imponendo al marker una corsa di 20 mm in direzione verticale verso il basso a velocità diverse.

Le prove sono state eseguite a partire dall'ultimo valore di velocità raggiunto nelle precedenti prove di sensibilità.

Il valori di velocità esaminati sono 160 mm/s, 170 mm/s e 180 mm/s.

- **Prova 2:** Velocità pistone: 170 mm/s

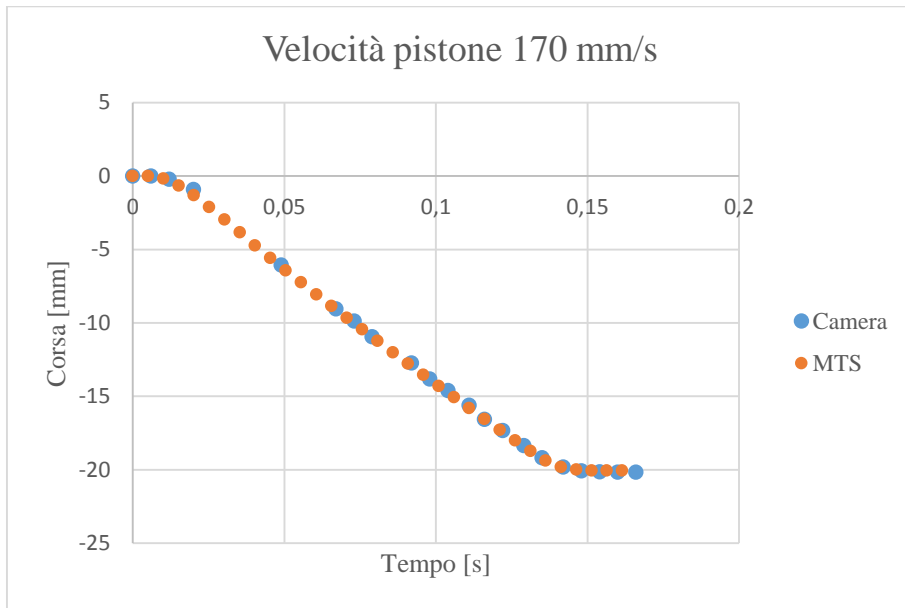


Figura 6.32 Punti elaborati dal sistema di visione nella prova 2.

- **Prova 3:** Velocità pistone: 180 mm/s

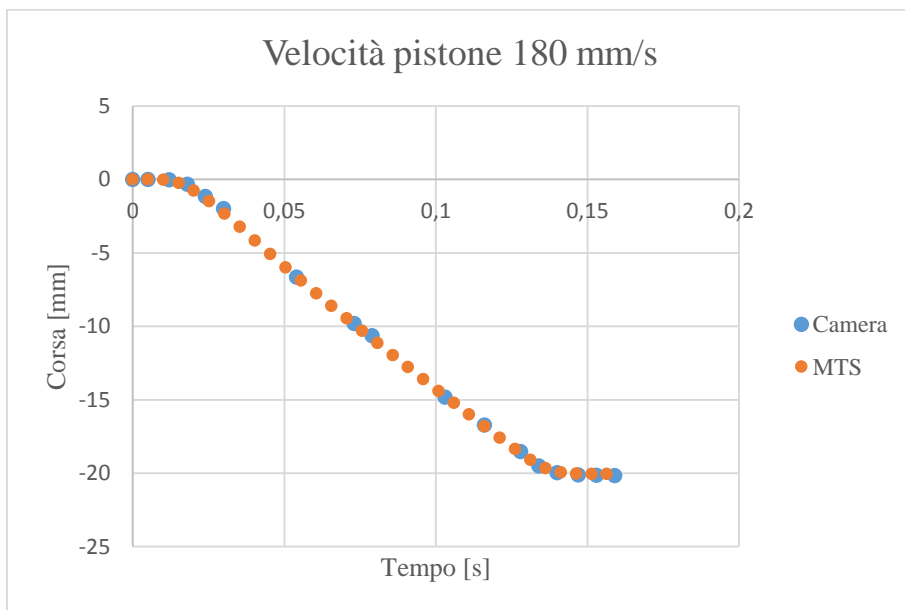


Figura 6.33 Punti elaborati dal sistema di visione nella prova 3.

Come si può notare in *Figura 6.32* il sistema è in grado di localizzare 13 punti in una corsa del marker di 20 mm alla velocità di 170 mm/s, mentre alla velocità di 180 mm/s è in grado di elaborare solo 9 punti, come si può vedere dalla *Figura 6.33*.

L'incertezza di misura estesa del sistema, con un livello di confidenza del 95%, ed i vari contributi di incertezza sono riportati in *Tabella 6.6*.

Tabella 6.6 Contributi di incertezza ed incertezza estesa del sistema di misura

	Misura Spostamento [mm]
Incertezza Rumore	$\pm 0,0008$
Incertezza Ripetibilità	$\pm 0,0013$
Incertezza Campione	$\pm 0,0006$
Incertezza Sensibilità	$\pm 0,0014$
Incertezza Estesa (P=95%)	$\pm 0,004$

Questo valore deve essere corretto per l'esecuzione delle prove sulla pressa per tenere in considerazione il rumore nel posizionamento dei marker introdotto dalle vibrazioni della macchina stessa.

6.2.2 Presentazione risultati delle prove su pressa a vite

Le prime prove eseguite sulla pressa a vite sono state quelle per la definizione del rumore nel posizionamento del marker quando la pressa è accesa. Vengono presentati i grafici della sola influenza del rumore in direzione orizzontale in quanto direzione critica per la presente applicazione di misura dello spostamento degli stampi.

In *Figura 6.34* è riportato il rumore nella localizzazione del marker in direzione orizzontale dello stampo inferiore, che come si può vedere questo è pari a $\pm 0,010$ mm.

Lo stesso valore si trova per il marker sullo stampo superiore, come si può vedere in *Figura 6.35*.

Anche per la direzione verticale sono stati trovati i medesimi risultati. Le vibrazioni legate alla rotazione dei volani della pressa influiscono dunque nello stesso modo sui due stampi.

Ripetendo la prova con lo stampo superiore posizionato a quote diverse rispetto allo stampo inferiore non si registrano variazioni di questo valore che, dunque, non dipende neanche dalla posizione del marker nell'immagine.

A questo punto è stato possibile calcolare l'incertezza di misura trovando un nuovo valore di l'incertezza estesa di $\pm 0,009$ mm con grado di confidenza del 95%.

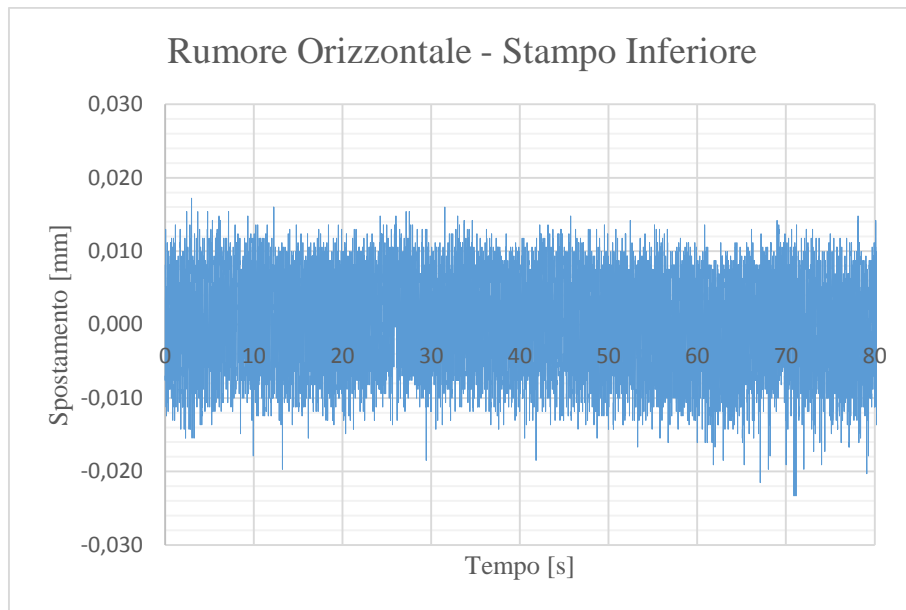


Figura 6.34 Rumore nel posizionamento del marker sullo stampo inferiore.

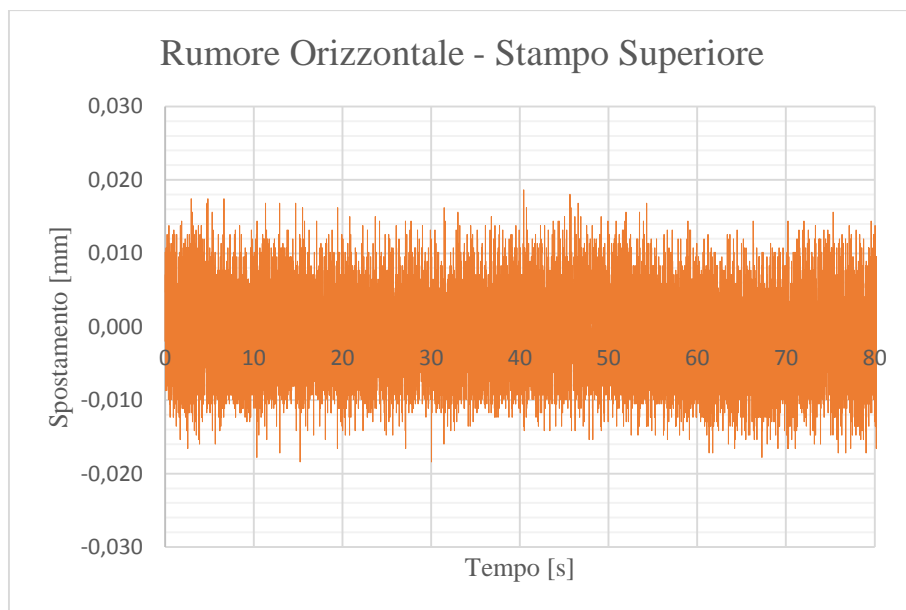


Figura 6.35 Rumore nel posizionamento del marker sullo stampo superiore.

Dalle prove “a vuoto” sulla pressa a vite è stato possibile ricostruire l’andamento degli spostamenti orizzontali al variare della quota iniziale di caduta della mazza, ossia al variare del carico in direzione verticale.

Viene fissata la convenzione con la quale si stabilisce come spostamenti orizzontali positivi quelli verso destra nella vista frontale della macchina. Questa definizione rimane valida anche per le successive prove di deformazione.

In *Tabella 6.7* vengono riepilogati gli spostamenti orizzontali misurati dello stampo superiore al variare del carico, rappresentati poi nel grafico di *Figura 6.36* in funzione della quota iniziale di

caduta della mazza. Si fa presente che per lo stampo inferiore non sono stati misurati spostamenti, salvo le vibrazioni dovute all'urto della mazza sulla tavola della pressa.

Tabella 6.7 Risultati delle misure dello spostamento orizzontale dello stampo superiore nelle prove "a vuoto". A destra i valori medi di velocità e spostamento alle varie quote iniziali della mazza.

Prova	Quota	V_{media}	x_i	x_f	Δx_{MAX}	Quota	V_{media}	$\Delta x_{MAX_{medio}}$
1	60	79,49	3,839	3,953	0,114	60	79,59	0,118
2	60	78,93	3,836	3,952	0,116			
3	60	80,34	3,832	3,955	0,123			
4	90	124,67	3,817	3,953	0,136	90	125,87	0,139
5	90	125,56	3,811	3,953	0,142			
6	90	127,37	3,814	3,954	0,140			
7	120	155,10	3,794	3,956	0,162	120	152,54	0,158
8	120	152,00	3,797	3,950	0,153			
9	120	150,52	3,792	3,950	0,158			
10	150	178,45	3,768	3,957	0,189	150	177,34	0,194
11	150	174,95	3,760	3,955	0,195			
12	150	178,61	3,754	3,953	0,199			
13	180	189,87	3,745	3,953	0,208	180	189,17	0,205
14	180	187,53	3,750	3,954	0,204			
15	180	190,10	3,746	3,950	0,204			

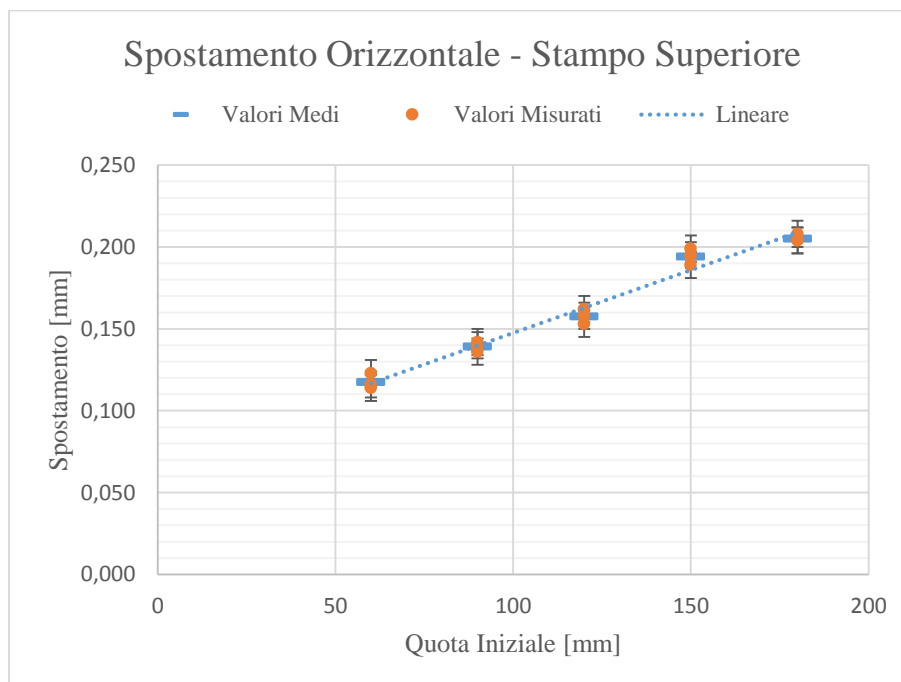


Figura 6.36 Misure degli spostamenti orizzontali dello stampo superiore in funzione della quota iniziale della mazza.

In *Figura 6.36* sono state indicate anche le bande di errore delle misure effettuate, grazie a queste è più semplice notare la compatibilità dei tre spostamenti misurati per ogni entità del carico. Si noti anche che una componente di spostamento orizzontale è sempre presente anche ai carichi inferiori, questa parte fissa può essere attribuita al gioco presente sulle guide su cui scorre la mazza. In questo caso per l'influenza del gioco in direzione orizzontale può essere eseguita una stima dopo avere trovato la retta interpolatrice che approssima il comportamento non perfettamente lineare della macchina. Si ricava di conseguenza che esso ha un valore di circa 0,070 mm.

Si noti che il verso dello spostamento in direzione orizzontale causato dal gioco delle guide risulta positivo rispetto la convenzione assunta.

A titolo di esempio vengono mostrati di seguito i grafici ottenuti da una delle prove con quota iniziale di caduta della mazza di 60 mm.

In *Figura 6.37* si possono vedere gli spostamenti in direzione verticale registrati per gli stampi. Grazie a questo grafico è facilmente individuabile l'urto e può quindi essere stabilito il punto dello stampo superiore registrato immediatamente prima dell'urto. La corrispondente posizione in direzione orizzontale di questo punto viene fissata come riferimento iniziale per il calcolo dello spostamento orizzontale dello stampo superiore. Così facendo viene bypassato il problema del non perfetto allineamento tra la direzione verticale della telecamera e quella di movimento della mazza che, come detto nel capitolo 5, diventa trascurabile quando si va a considerare solo il campo di spostamento conseguente all'urto.

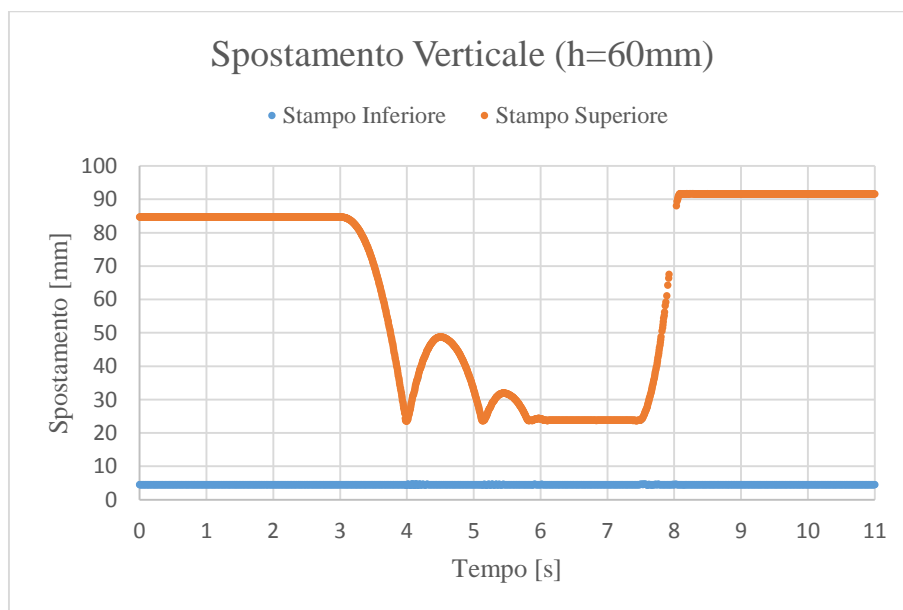


Figura 6.37 Posizioni in direzione verticale dei marker registrate durante l'esecuzione di una delle prove a quota iniziale di 60 mm.

In *Figura 6.38* sono invece mostrate le posizioni in direzione orizzontale registrate per i marker dalle quali è stato ricavato lo spostamento in direzione orizzontale degli stampi come differenza tra le rispettive posizioni immediatamente prima dell'urto e quelle a stampo chiuso. Si vede chiaramente che per lo stampo inferiore non si sono registrati spostamenti in direzione orizzontale conseguenti al colpo della mazza. Infatti si registrano solo le vibrazioni conseguenti all'urto e le vibrazioni della macchina in fase di risalita della mazza.

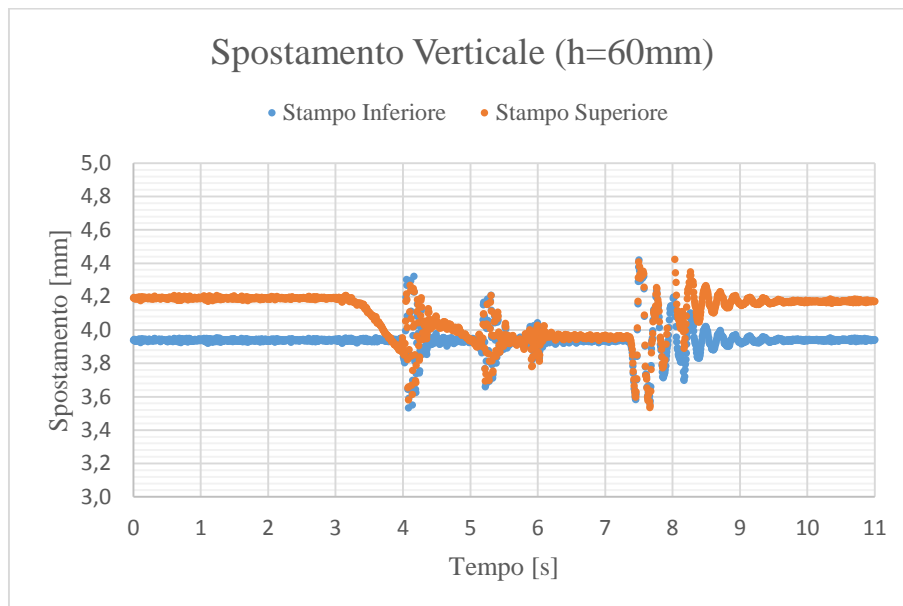


Figura 6.38 Posizioni in direzione orizzontale dei marker registrate durante l'esecuzione di una delle prove a quota iniziale di 60 mm.

Dall'esecuzione delle prove di deformazione è stato possibile studiare il comportamento dinamico della pressa in condizioni di carico combinate in direzione verticale ed in direzione orizzontale. In queste si è cercato di mantenere il carico in direzione verticale costante eseguendo le prove lasciando cadere la mazza delle pressa sempre dalla medesima quota iniziale. Il carico in direzione orizzontale invece è stato fatto variare andando via via ad aumentare lo spessore del componente forgiato.

Le prove dalla 1 alla 6 sono state fatte posizionando il provino trapezoidale al centro degli stampi in modo da creare solo un carico in direzione orizzontale, oltre al carico verticale centrato rispetto gli stampi. Le ultime due prove sono invece state eseguite posizionando i provini ai lati dello stampo, in questo modo è stato introdotto anche una rotazione dovuta al momento generato dall'eccentricità del carico verticale.

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i risultati delle misure eseguite. In queste il segno davanti il valore dello spessore è stato usato per indicare se la posizione del provino è tale da provocare uno

spostamento equiverso, nel caso di valore positivo, o contrario, valore negativo, rispetto allo spostamento assunto positivo per convenzione.

In *Tabella 6.8* vengono riportati i risultati ottenuti dalle misure degli spostamenti orizzontali dello stampo superiore. Per quanto riguarda lo stampo inferiore non sono stati rilevati spostamenti salvo quelli legati alle vibrazioni nel momento dell'urto tra la mazza e lo stampo inferiore e quelli dovuti alla salita della mazza stessa che non interessano allo scopo.

Tabella 6.8 Risultati delle misure di spostamento orizzontale dello stampo superiore nelle prove di deformazione.

Prova	Spessore	x_i	x_f	Δx_{MAX}
1	-20	3,793	3,198	-0,595
2	20	3,785	4,527	0,742
3	-30	3,448	2,711	-0,737
4	30	3,113	3,993	0,880
5	-35	3,347	2,506	-0,841
6	35	3,676	4,585	0,909
7	-30	3,794	2,986	-0,808
8	30	3,507	4,326	0,819

In *Figura 6.39* sono rappresentati gli spostamenti misurati in funzione dello spessore del provino deformato.

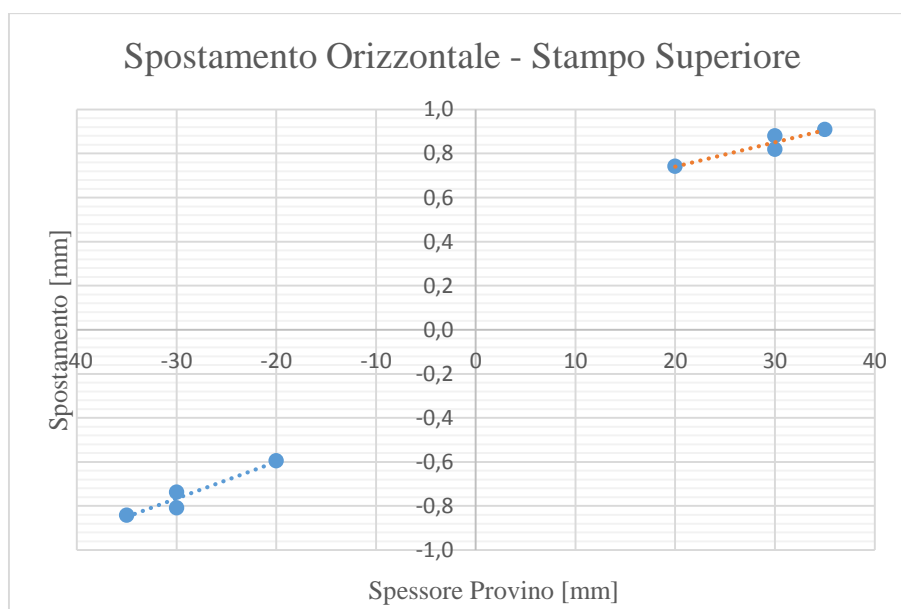


Figura 6.39 Spostamenti orizzontali dello stampo superiore misurati in funzione dello spessore del provino forgiato.

Come si può chiaramente vedere gli spostamenti ottenuti sono maggiori rispetto alle prove a vuoto. Nonostante questo, si ricava un comportamento delle pressa lineare al variare dell'entità del carico. La pendenza trovata per carichi positivi varia infatti del solo 3,3% rispetto alla pendenza trovata per carichi negativi.

Si nota però una diversa influenza del gioco presente sulle guide in relazione al verso di applicazione del carico. Questo è dovuto alle imperfette caratteristiche geometriche delle guide stesse causate dalla loro usura.

CAPITOLO 7

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stato realizzato lo sviluppo di un sistema di visione in grado di misurare parametri dimensionali in real-time durante il processo e sono stati eseguiti dei test per valutarne il funzionamento e le potenzialità nell'applicazione a due diversi processi produttivi.

Per entrambe le applicazioni sono state studiate le soluzioni hardware e software che hanno permesso di incrementare le prestazioni di acquisizione e di elaborazione dei dati dei progetti realizzati per poter rispondere in modo efficiente ai requisiti di temporizzazione inizialmente richiesti.

Per quanto riguarda il processo di piegatura della lamiera la versatilità del sistema messo a punto è garantita dal programma di controllo del sistema stesso. Infatti, attraverso dei comandi semplici ed intuitivi, l'operatore ha la possibilità di adattare efficientemente il sistema a varie tipologie di piegatura in base alle esigenze applicative.

Attraverso le prove sperimentali è stato possibile valutare le prestazioni del sistema applicato al caso della piegatura della lamiera su tre punti ed è stato eseguito il confronto tra le configurazioni di acquisizione studiate. In particolare è stato rilevato che a piena risoluzione il sistema ha un'incertezza di misura di $\pm 0,02^\circ$ mentre a risoluzione verticale dimezzata si ottiene una incertezza di $\pm 0,03^\circ$ entrambe valutate con un livello di confidenza del 95%. Questi risultati consentono di affermare che il sistema è dotato di una buona affidabilità di misura in ambedue le configurazioni.

Dal confronto con le precisioni dei sistemi di controllo dell'angolo di piega attualmente impiegati in ambito aziendale il sistema di visione proposto si piazza in primissima fascia dal punto di vista dell'accuratezza della misura.

Inoltre, grazie alle elevate velocità di acquisizione ed elaborazione delle soluzioni proposte, il sistema è in grado di fornire dati sul valore dell'angolo di piega in tempo reale in modo che si possa eseguire la correzione dinamica del fenomeno del ritorno elastico.

Le caratteristiche di questo sistema consentono anche una precisa valutazione del fattore di ritorno elastico, come è stato appurato da un'altra campagna di prove. Ciò rende adatto questo sistema anche all'impiego durante le prove sperimentali per la costruzione delle curve del fattore di ritorno elastico. Il sistema sviluppato si presta ad ulteriori sviluppi futuri in primo luogo per quanto riguarda la piegatura di profili a doppia curvatura. Per questi infatti è stato sviluppato un programma che consente di acquisire dati sulla geometria del profilo della lamiera ad elevata velocità ma la cui elaborazione avviene offline. Si ritiene dunque necessario ottimizzare il programma perché consenta la determinazione in real-time del fenomeno del ritorno elastico ritorno durante il processo di piegatura. Il sistema di visione è poi stato utilizzato per la misura degli spostamenti degli stampi di una pressa a vite durante il processo di forgiatura a freddo. Questo ha permesso di valutare la capacità del sistema di visione nella misura delle deflessioni della pressa necessarie per il calcolo della rigidità della macchina stessa.

Le prove sperimentali hanno evidenziato una precisione nella misura degli spostamenti influenzata soprattutto dalle vibrazioni della pressa stessa. In particolare l'incertezza di misura è pari a 0,010 mm con un grado di confidenza del 95%.

Un altro limite del sistema di visione messo in luce dalle prove è legato alla velocità di spostamento massima rilevabile che, nella configurazione esaminata è pari a 180 mm/s.

Entro i vincoli di prova determinati il sistema è comunque in grado di operare in maniera efficiente, infatti ha permesso una ricostruzione del comportamento dinamico della pressa che è risultato compatibile con quanto atteso.

Grazie alle prove sperimentali sono emersi altri importanti fattori che, tramite i giusti interventi, permettono di ottimizzare le prestazioni del sistema per un suo uso specifico e dedicato a questa applicazione. Innanzitutto fissando la telecamera in modo solidale al corpo macchina si possono ridurre gli effetti negativi che le vibrazioni causano sulla misura degli spostamenti, rendendo anche più efficace l'utilizzo dei filtri che ne smorzano l'effetto. È possibile anche studiare una configurazione che permetta la misura degli spostamenti in due direzioni del piano orizzontale prendendo in considerazione la possibilità di ricorrere ad una seconda telecamera.

Infine, dopo aver progettato un sistema per l'applicazione ed il controllo del carico nelle direzioni orizzontali, si può pensare di integrare i sistemi di carico e di misura degli spostamenti, attraverso la piattaforma LabVIEW ad esempio, per riuscire a determinare direttamente la rigidità della pressa ed il suo comportamento statico e dinamico.

Tramite il sistema di visione è possibile misurare anche le rotazioni subite dagli stampi, nella stessa configurazione usata per le misurazioni degli spostamenti, tramite l'utilizzo di marker con una geometria appositamente studiata. Questa soluzione richiede però anche l'ottimizzazione della parte software che richiede tempi di elaborazione maggiori per il matching di modelli più complessi.

I dati ricavati da queste prove consentono dunque la determinazione della rigidità della pressa, la cui conoscenza, in fase di progettazione e/o simulazione numerica del processo di forgiatura, risulta indispensabile per ottenere tolleranze ristrette ed un a vita in servizio delle attrezzature duratura.

Appendice A

Creazione di un disco virtuale in Windows 8.1

Il sistema operativo Windows 8.1 offre la possibilità di creare e gestire unità disco virtuali in formato VHD (acronimo di “Virtual Hard Disk”). Questo ha le stesse funzionalità di un disco fisico solo che dedica tutto il suo spazio di memoria all’esecuzione delle funzioni che deve implementare. Quindi consente ad esempio di velocizzare la lettura e la scrittura di file, l’esecuzione di funzioni e l’elaborazione dei dati.

Per l’esecuzione dei programmi realizzati in questo lavoro è stato scelto di sfruttare questa funzione nel dispositivo Host utilizzato al fine di massimizzarne la velocità di elaborazione perché questa non impedisse di sfruttare a pieno la frequenza di acquisizione di immagini della telecamera.

La creazione di una nuova unità disco virtuale si concretizza in pochi passi. Prima di tutto bisogna entrare nella finestra “Questo PC” e nel menu veloce nella parte superiore finestra cliccare sull’icona “Gestisci” presente tra i comandi di sistema.

Nella finestra “Gestione computer” bisogna selezionare dal menu ad albero sulla sinistra la voce “Gestione Disco” e dal menu “Azione” si dovrà quindi cliccare su “Crea file VHD”.

A questo punto è possibile specificare il percorso ove si desidera venga memorizzata l’unità disco virtuale. Va tenuto presente come tutto il contenuto di tale unità venga conservato su un disco fisso sotto forma di un unico file in formato VHD.

È possibile specificare le dimensioni da assegnare all’unità virtuale (in MB, GB o TB) ed indicare se il disco sia a dimensione fissa o a dimensione variabile. Scegliendo “A dimensione fissa” il file VHD occuperà sin da subito, sul disco fisso, il quantitativo di spazio specificato nella casella “Dimensioni disco rigido virtuale”. Optando invece per “A espansione dinamica”, il file VHD crescerà via via in dimensioni al bisogno, a seconda del quantitativo di memoria richiesta all’interno del disco virtuale. Dal punto di vista prestazionale le migliori performance si ottengono scegliendo che questo sia a dimensione fissa.

Dopo avere cliccato sul pulsante “OK” ed atteso che l’unità venga creata, nella finestra “Gestione Disco” di Windows 8.1 si troverà elencata la nuova unità virtuale.

Affinché l’unità disco virtuale sia effettivamente utilizzabile è necessario cliccare con il tasto destro del mouse sull’etichetta “Disco N – Sconosciuto” e scegliere la voce “Inizializza disco”.

Nella finestra successiva basterà lasciare selezionato “MBR” e premere sul pulsante “OK”. Per creare un volume nello spazio non allocato, è necessario fare clic con il tasto destro del mouse e scegliere “Nuovo volume semplice”.

Cliccando due volte su “avanti” si assegnerà all’unità la massima dimensione disponibile quindi, attraverso la schermata successiva, si potrà scegliere la lettera identificativa da associare al disco virtuale.

L’ultimo passo consiste nel selezionare il file system da usare, nello specificare un’eventuale etichetta per l’unità ed eventualmente nell’attivazione della formattazione veloce.

Il disco virtuale appena creato verrà poi elencato sia nella finestra “Questo PC” che in “Gestione disco” e risulterà accessibile da qualunque applicazione installata sul sistema.

A questo punto i programmi realizzati vengono inseriti nel disco virtuale e da questo vengono eseguiti durante le applicazioni.

Appendice B

Creazione del modello del marker con il software *NI Vision Template Editor*

La creazione della geometria del modello è un passaggio di fondamentale importanza per quanto riguarda il corretto funzionamento delle funzioni di Geometric Matching. In questo lavoro per il marker è stata scelta una geometria semplice in modo da alleggerire il compito del calcolatore nella fase di ricerca. Ciò non toglie che una definizione del modello da cercare troppo grossolana potrebbe portare a falsi matching nell'immagine o a non rilevare i marker presenti nelle immagini rilevate con la telecamera.

Per la creazione della geometria del marker è stata usata uno dei software contenuti nel pacchetto *NI Vision* chiamato *NI Vision Template Editor*.

Dopo avere avviato il programma tramite l'apposita icona dal menu "File" si seleziona il comando "New Template" per creare una nuova geometria modello.

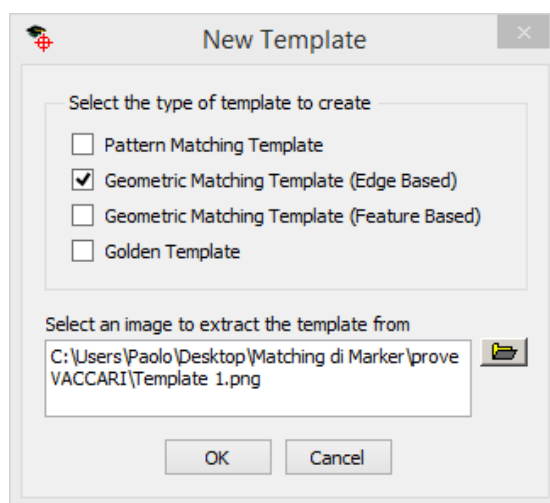


Figura B.1 Finestra *New Template* del *NI Vision Template Editor*.

Nella prima finestra che appare, mostrata in *Figura B.1*, si deve andare a scegliere il criterio da usare per la creazione e si deve scegliere il percorso per caricare l'immagine di riferimento per la creazione del modello.

Per il caso in esame in cui si esegue la ricerca di un marker il criterio di creazione selezionato è il "Geometric Matching Template (Edge Based)". Questo prevede che la geometria del modello venga definita in base al contorno dell'oggetto ricercato. Nell'immagine si avranno dei matching solo se si ha una corrispondenza con il contorno definito. Nel caso invece si scegliesse il criterio "Geometric Matching (Feature Based)" il modello verrebbe definito come particolare caratteristica geometrica, ad esempio un rettangolo, e nell'immagine si avrebbero dei matching ogni qualvolta questa feature viene individuata nell'immagine. Con questo criterio il matching risulta molto più complicato e laborioso e porta molte volte ad individuare feature che non si era interessati ad individuare.

Nel passaggio successivo viene visualizzata nel display l'immagine raffigurante il modello e viene richiesto di circoscrivere la geometria di interesse tramite una funzione ROI.

A questo punto il software estrae in automatico i contorni degli oggetti contenuti in questa zona e dà la possibilità all'utente di modificare questa definizione tramite comandi manuali eseguibili in modo interattivo direttamente sull'immagine visualizzata nel display. Questi comandi permettono sia di modificare il contorno che di selezionare delle zone dell'immagine da trascurare.

In questa fase è anche possibile impostare i parametri con i quali viene eseguita l'estrazione del contorno del marker per variare la precisione della definizione.

Si tenga presente che una definizione troppo restrittiva non è funzionale ai fini dell'applicazione perché anche una piccola differenza tra il marker e quello di modello potrebbe portare a non avere il matching.

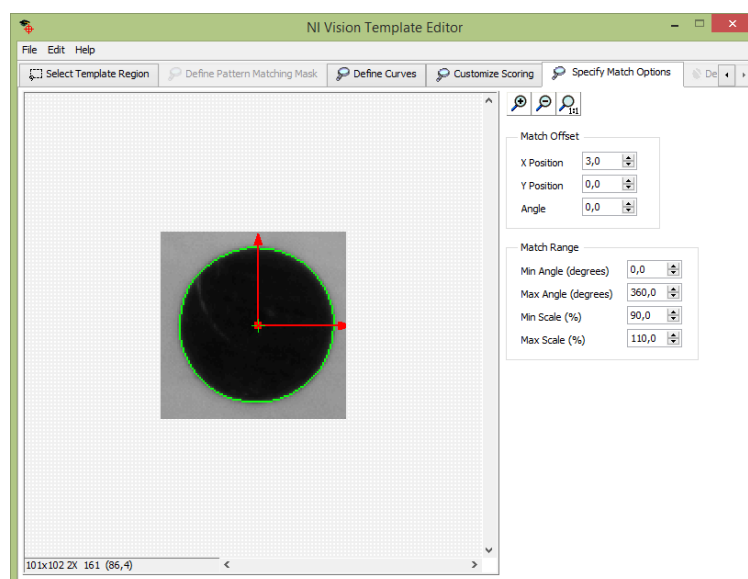


Figura B.2 Definizione della geometria del marker.

Nell'ultimo passaggio si va a definire la posizione dell'origine e l'orientamento del sistema di coordinate relativo al marker, questo si può vedere in *Figura B.2*.

A questo punto alla geometria del modello creata viene attribuito un nome e viene salvata per poter poi essere richiamata in fase di esecuzione del programma creato per il matching.

Attraverso questo software si ha la possibilità di creare una libreria di geometrie modello che risulta molto utile al variare della geometria da cercare durante l'esecuzione del programma o quando sono richiesti matching multipli nell'immagine.

Appendice C

Valutazione della sensibilità dell'ottica alla luminosità

Nel corso del lavoro è stata dedicata una parte anche all'analisi dell'acquisizione di immagini di oggetti a temperatura elevata. Lo scopo di questa analisi è stato quello di verificare le prestazioni e l'affidabilità del sistema di visione per un eventuale utilizzo nelle lavorazioni a caldo.

In queste condizioni operative il problema fondamentale è legato al fatto che l'oggetto che viene ripreso emette luce alle alte temperature. L'intensità della luce emessa ed il suo colore dipendono dal materiale di cui è costituito l'oggetto e dalla sua temperatura.

Durante l'acquisizione delle immagini la radiazione luminosa che viene emessa dall'oggetto viene rilevata dal sensore della telecamera e può causare la perdita di dettagli e di nitidezza nell'immagine. Sono state dunque eseguite delle prove di localizzazione del bordo dell'oggetto su tre campioni di materiale diverso, alluminio, ottone e bronzo, per testare l'affidabilità dell'informazione ricavata.

Le prove sono state eseguite posizionando i provini in un forno a muffola e riscaldandoli per vedere le variazioni dell'informazione di fitting ricavata. Come parametro di confronto è stata scelta la linearità del bordo (Edge Straightness) che viene restituita in output dopo il fitting dei punti del bordo rilevati e che non è altro che l'errore medio quadratico dei punti rispetto la linea interpolatrice.

Dopo aver rilevato la linearità in un tratto del bordo dei campioni a temperatura ambiente, il cui valore era per tutti e tre i provini inferiore all'unità, questi sono stati riscaldati a step crescenti di 50°C ed è stata rilevata la linearità del bordo eseguendo la misura direttamente dentro il forno in modo da considerare sempre lo stesso tratto dell'oggetto.

Per tutti i materiali considerati, a temperature inferiori a 650°C non si sono ottenuti valori con scostamenti rilevanti da quello di riferimento.

A questo punto si può affermare che nel caso di componenti in alluminio, la cui temperatura di fusione è compresa tra i 510°C e i 650°C, le prestazioni del sistema rimangono inalterate grazie alle proprietà del materiale stesso che non portano ad emissività tali da compromettere la qualità dell'immagine.

Per i campioni in ottone ed acciaio si sono eseguite prove fino a 900°C. A questa temperatura i valori di emissività sia dell'oggetto in esame che del materiale refrattario di cui è costituita la parte interna del forno a muffola sono tali da provocare la saturazione dell'immagine.

La saturazione comporta la perdita di qualità dell'immagine e quindi un calo di prestazioni delle funzioni di elaborazione implementate.

Come si può vedere in *Figura C.1* questo si ripercuote subito sulla definizione della feature lineare che raggiunge valori di errore medio quadratico superiori a 10, inoltre si vede come il bordo identificato non corrisponda al bordo che l'occhio umano riesce ad intravedere nell'immagine.

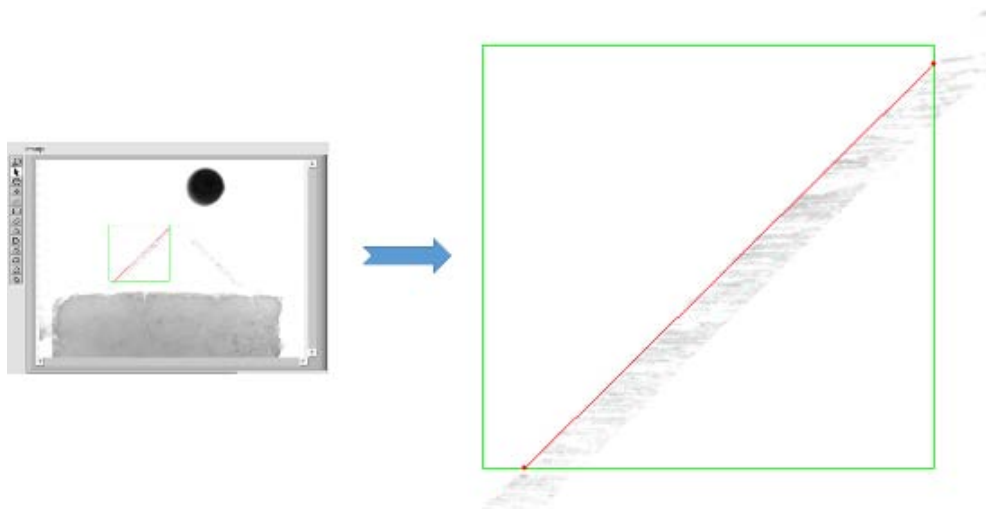


Figura C.1 Feature lineare individuata nell'immagine acquisita a 900°C con f/8.

Tramite la regolazione del rapporto focale dell'ottica è stato possibile variare la luminosità acquisita dalla telecamera e mantenere la qualità anche per le immagini di oggetti ad elevata temperatura.

Il rapporto focale indica il rapporto tra la lunghezza focale di una lente ed il diametro di apertura numerica dell'ottica. Questo rapporto è espresso graficamente con “f/” seguito da un numero che determina le caratteristiche dell'ottica.

All'aumentare del rapporto focale diminuisce la luminosità dell'obbiettivo.

L'ottica utilizzata, cioè la lente *Schneider Componon-S 2.8/50*, è dotata di un diaframma regolabile che consente di variare il rapporto focale tra i valori: f/2,8; f/4; f/5.6; f/8; f/11 ed f/16. ^[15]

È possibile dunque aumentare il rapporto focale della lente per ottenere una immagine di qualità sufficiente per riuscire ad identificare una feature lineare di qualità.

L'aumento deve essere consono alla luminosità dell'immagine, infatti valori di rapporto troppo alti portano al problema inverso di saturazione con immagine troppo scura e quindi ancora di qualità scadente.

Dalle prove eseguite si è trovato che la massima temperatura di esercizio, sia con l'ottone che con l'acciaio, che consente di acquisire tramite la telecamera immagini di qualità impostando il rapporto focale al massimo valore consentito è di 900°C.

Si veda ad esempio in *Figura C.2* che alla temperatura di 900°C, regolando il rapporto focale dell'obiettivo a f/16, si riesce ad ottenere una feature lineare con valore di Edge Straightness di circa una unità e dunque di accettabile qualità.

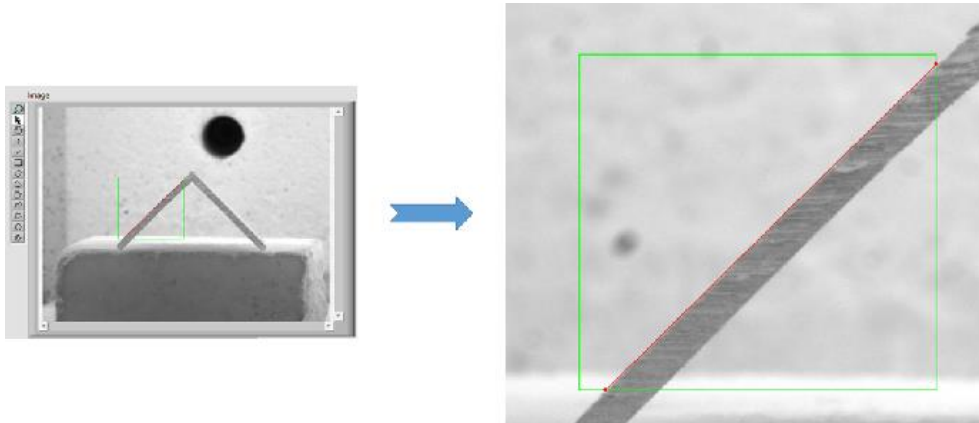


Figura C.2 Feature lineare individuata nell'immagine acquisita a 900°C con f/16.

Bibliografia

- [1] E.N. Malamas, E. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit, J.D. Legat (2003). A survey on industrial vision System, applications and tools. *Image and Vision Computing* 21 (171-188).
- [2] N.A. Thacker, A.F. Clark, J.L. Barron, J.R. Beveridge, P. Courtney, W.R. Crum, V. Ramesh, C. Clark (2008). Performance characterization in computer vision: A guide to best practices. *Computer Vision and Image Understanding* 109 (305-334).
- [3] A. Fusco, P. Salvador, G. Bortolussi (2001). La visione artificiale: stato dell'arte e applicazioni. Progetto NOVIMPRESA, AREA SciencePark.
- [4] S. Kalpakjian, S.R. Schmid (2008). *Tecnologia Meccanica – quinta edizione*. Pearson Paravia.
- [5] G. D'Urso (2009). *Materiali e tecnologie di lavorazione della lamiera*. Università degli Studi di Bergamo.
- [6] D. Cammi, D. Malara, M. Scrivani, R. Viganò, P. Magni (2006). Misuratore d'angolo. Progetto d'anno per Schiavi Macchine spa. Politecnico di Milano.
- [7] K. Chodnikiewicz, R. Balendra, T. Wanhein (1994). A new concept for the measurement of press stiffness. *Journal of Material Processing Technology* 44 (293-299).
- [8] M.H. Parsa, S. Nasher, H. Pishbin, M. Kazemi (2012). Investigating spring back phenomena in double curved sheet metals forming. *Materials and Design* 41 (326-337).
- [9] M. Arentoft, T. Wanhein (2005). A new approach to determine press stiffness. *Journal of Material Processing Technology*.
- [10] V. Krusic, M. Arentoft, S. Masera, A. Pristovsek, T. Rodic (2011). A combined approach to determine workpiece-tool-press deflection and tool loads in multistage cold-forging. *Journal of Material Processing Technology*.
- [11] H. Ou, W.H. Ferguson, R. Balendra (1999). Assesment of the elastic characteristics of an 'infinite stiffness' physical modelling press. *Journal of Material Processing Technology* 87 (28-36).
- [12] M. Arentoft, M Eriksen, T. Wanhein (2000). Determination of six stiffness for a press. *Journal of Material Processing Technology* 105 (246-252).
- [13] M. Javadi, B.A. Behrens, R Krimm (2009). Efficient control of metal-forming machines with an automated load and measurement device. Institute of Metal Forming and Metal-Forming Machines. Garbsen, Germany.
- [14] D.A. Schoch (2000). System for monitoring the dynamic tooling/shutheight deflection activity within a press machine. Patent US 6114965°.

- [15] Jos. Schneider Optische Werkw GmbH (20 November 2008). Schneider Kreuznach Macro lens Componon-S 2.8/50-0018 Datasheet.
- [16] Allied Vision Technologies Canada Inc. (2012). Prosilica GT 1660/1660C Datasheet.
- [17] Allied Vision Technologies Canada Inc. (6 September 2013). Camera and Driver Features AVT GigE Cameras.
- [18] National Instruments Corporation (August 2011). LabVIEW Core 1 – Manuale del corso.
- [19] National Instruments Corp. (August 2011). LabVIEW Core 2 – Manuale del corso.
- [20] National Instruments Corp. (August 2012). Getting Started NI Vision.
- [21] National Instruments Corp. (January 2012). NI Vision – IMAQ Vision Concept Manual.
- [22] G. Fanti (2007). Sistemi di visione per misure dimensionali. Padova, Libreria Progetto.
- [23] National Instruments Corporation (August 2012). IMAQ Vision for LabVIEW.
- [24] Allied Vision Technologies Canada Inc. (29 October 2012). Installation Manual AVT GigE Vision Cameras.
- [25] National Instruments Corporation (11 July 2013). Acquiring from GigE Vision Cameras with Vision Acquisition Software – Part I and II (online).
- [26] L. De Chifre (2011). Geometrical Metrology and Machine Testing. Technical University of Denmark.
- [27] ISO ENV 13005. Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM).
- [28] G. Fanti (2012). Appunti di misure meccaniche e termiche. Padova, Libreria Progetto.
- [29] ISO/DIS 10360 – Part 7. Geometrical Product Specification (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) – Part 7: CMMs equipped with imaging probing systems.
- [30] VDI/VDE 2617 – Part 6. Accuracy of coordinate measuring machines; characteristic parameter and their checking – Coordinate measuring machines with optical probes.
- [31] Dispense online del corso CMTrain-CMM-Operator (level 1-2).

Siti web

www.visionsys.it

www.wikipedia.org

www.vaccaripresse.com

www.alliedvisiontec.com

www.ni.com

www.forums.ni.com

www.lavag.org/forum