

UNIVERSITÀ DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA

**SISTEMA DI VISIONE INDUSTRIALE
PER IL CONTROLLO QUALITÀ IN 3D**

Laureando: Daniele Alberton

Relatore: Prof. Emanuele Menegatti

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Informatica

Padova, 19 Aprile 2011

Anno Accademico 2010/2011

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Emanuele Menegatti per i preziosi insegnamenti ricevuti durante quest'ultimo anno di laurea specialistica. Inoltre, ringrazio sentitamente l'Ing. Matteo Munaro e l'Ing Stefano Michieletto che hanno lavorato con me in questo progetto e sono stati sempre disponibili a dirimere i miei dubbi durante la stesura di questo lavoro.

Un doveroso grazie è rivolto allo zio Ing. Roberto Alberton per l'aiuto prestatomi nella correzione della tesi.

Ringrazio con affetto i miei genitori e i fratelli per aver sempre sostenuto le mie scelte, sperando che questo traguardo li riempia di soddisfazione. Un pensiero va anche a tutti i parenti per il sostegno e la fiducia che mi hanno dimostrato.

Ringrazio Giulia che standomi sempre accanto con estrema pazienza mi ha incoraggiato dicendomi che potevo farcela.

Desidero ringraziare anche tutti gli amici: quelli di una vita, quelli passeggeri, quelli che ci sono sempre pur non facendosi vedere, quelli con cui ho lavorato e condiviso nuove prospettive, quelli che per essere presenti il giorno della mia laurea si sono dovuti "ammalare" e i migliori amici. I loro nomi sono nella mia mente e nei tanti ricordi che ci accomunano.

Impossibile dimenticare i compagni d'università con cui, fin dall'inizio o per la durata di un esame, abbiamo affrontato insieme questa avventura.

Sommario

Obiettivo di questa tesi è la progettazione e la realizzazione di un sistema automatico di ispezione ottica capace di creare modelli 3D di oggetti combinando dati di forma e texture. Il presente lavoro di tesi è focalizzato principalmente sui seguenti aspetti:

- studio e realizzazione hardware del sistema di visione;
- implementazione funzioni di supporto per l'elaborazione del modello 3D;
- studio e sviluppo di funzioni per il controllo qualità in 3D.

L'oggetto viene analizzato mediante una "lama" di luce laser, e una telecamera a CCD ne registra il profilo e la texture. La posizione spaziale dei punti sul profilo viene ricavata per triangolazione. Il modello 3D viene composto muovendo il sistema rispetto all'oggetto per acquisire tutti i profili necessari. La texture viene composta come ortoimmagine e applicata al modello calcolato.

Questa tesi è stata svolta nell'ambito di un progetto europeo cui partecipa il Laboratorio di Sistemi Autonomi Intelligenti (IAS-LAB) dell'Università degli Studi di Padova.

Nel primo capitolo viene introdotto l'ambito in cui si inserisce il progetto. Viene riportato un studio sullo stato dell'arte analizzando pregi e difetti dei sistemi di visione presenti sul mercato.

Nel secondo capitolo viene descritto il progetto europeo *3DComplete* all'interno del quale è stato svolto il lavoro di tesi. Vengono riportate le specifiche e gli obiettivi del progetto, la suddivisione del lavoro tra i partner e i casi selezionati per i test.

Il terzo capitolo descrive la realizzazione del sistema dal punto di vista dell'hardware.

Nel quarto capitolo viene trattata la calibrazione del sistema e il programma per l'elaborazione del modello 3D.

Nel quinto e ultimo capitolo vengono sviluppate le funzioni per il controllo di qualità in 3D, ponendo l'attenzione sull'individuazione di alcuni dei difetti di riferimento per il progetto *3DComplete*.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Automated Optical Inspection	1
1.1.1	3D Completeness Inspection	2
1.2	Limiti dei sistemi 2D	2
1.3	Sistemi 3D	3
1.3.1	Stato dell'arte	3
1.3.2	Acquisizione di 3D shape	4
1.3.3	Videocamere stereo	7
1.3.4	Acquisizione di 3D appearance	8
1.3.5	Algoritmi per la Completeness Inspection	9
1.4	I sistemi AOI per il controllo di PCB	11
1.4.1	I sistemi presenti sul mercato	12
2	Progetto <i>3DComplete</i>	15
2.1	Introduzione	15
2.2	Tecnologie 3D	15
2.2.1	Full 3D Inspection	16
2.2.2	Extended 2.5D Inspection	16
2.3	Specifiche	18
2.4	Obiettivi	19
2.5	I partner	19
2.6	Test Case	21
3	Il sistema di visione: Hardware	23
3.1	Descrizione del sistema	23
3.2	Texture 2D: la videocamera	25
3.2.1	Confronto tra sistema con videocamera basato su PC e smart camera	26
3.2.2	mvBlueCOUGAR-X	27
3.2.2.1	mvIMPACT	29
3.2.3	Ottica	30
3.2.3.1	Ottica 1:2.0/15mm	33
3.2.3.2	Ottica 1:1.4/16mm	33
3.3	Shape 3D: <i>triangulation laser profile scanner</i>	33
3.3.1	Z-Laser ZM18S	34

3.3.2	Limiti della triangolazione con luce laser	34
3.3.3	Configurazione laser-videocamera	35
3.4	La movimentazione	38
3.4.1	Mitsubishi Melfa RV-2A	39
3.5	Illuminatori	39
3.5.1	Configurazione ottimale	40
3.5.2	Configurazione del prototipo	41
3.6	Conclusioni	42
4	Composizione dei modelli 3D	45
4.1	Rappresentazione del modello 3D	45
4.2	Analisi funzionale	46
4.2.1	Prototipo	47
4.2.2	Sistema definitivo	48
4.3	Ambiente di lavoro	49
4.3.1	Matlab	49
4.3.2	Visual Studio	50
4.3.3	VirtualDub	50
4.3.4	MeshLab	51
4.4	Programmazione dei movimenti	51
4.5	Calibrazione	53
4.5.1	Videocamera	53
4.5.2	Piano laser (parametri estrinseci)	53
4.5.3	Direzione di avanzamento	56
4.6	Acquisizione profili e texture	56
4.7	Tool di elaborazione in Matlab	59
4.7.1	Descrizione funzionale	59
4.7.2	Laser detection	59
4.7.3	Triangolazione laser	64
4.7.4	Stima posizioni di acquisizione	65
4.7.5	Composizione del modello	65
4.8	Risultati	68
5	Controllo qualità in 3D	69
5.1	Introduzione	69
5.2	Metodologie	70
5.2.1	Controllo qualità automatico	71
5.2.2	Controllo qualità semi-automatico	72
5.3	Descrizione funzionale	72
5.4	Identificazione delle componenti nell'immagine di texture	73
5.4.1	Funzione per la ricerca di componenti elettronici	73
5.5	Controllo presenza/assenza dei componenti su PCB	75
5.5.1	Applicazione su scheda Cobra At	75
5.5.2	Applicazione su scheda Selcom	77
5.6	Controllo inclinazione componenti PTH	77

5.6.1	Stima del piano passante per una nuvola di punti	78
5.6.2	Calcolo dell'inclinazione reciproca tra 2 piani	78
5.6.3	Applicazione su scheda Selcom	79
5.6.4	Applicazione su scheda Cobra At	80
5.7	3D Edge detection	83
5.7.1	Correzione delle zone d'ombra	83
5.7.2	Test su scheda Cobra At	84
5.8	Configurazione dei controlli: interfaccia utente	84
5.8.1	Il software <i>3DC ParamSet</i>	84
5.9	Controllo saldature componenti PTH	85
5.9.1	Classificazione dei difetti più comuni nelle saldature	86
5.9.2	Approccio "Tiered-Color Illumination"	86
5.9.3	Utilizzo della tecnica Tiered-Color Illumination nel progetto 3DComplete	87
6	Conclusioni e sviluppi futuri	93
A	Catalogo difetti PCB	95
B	Catalogo difetti BMW	109
C	Catalogo difetti Ardoran	115
D	Risultati e modelli	119
D.1	Cobra (1 laser)	121
D.2	Cobra (2 laser)	122
D.3	Cobra B (1 laser)	123
D.4	Selcom (1 laser)	124
	Bibliografia	125

Elenco delle figure

1.1	Configurazione per la triangolazione laser (sinistra). Effetto di una linea laser proiettata su una superficie curva (destra).	5
1.2	Immagine di profondità ottenuta con una videocamera ToF. La bassa risoluzione limita le informazioni estraibili dall'immagine.	6
1.3	La CamCube prodotta da PMD[vision] [®] .	6
1.4	Percezione della vista umana (sinistra) e una sua implementazione con un sistema di videocamere <i>binocular stereo</i> ("Bumble Bee 2" della ditta PointGray Inc.) (destra).	7
1.5	Sistema di acquisizione per il 3D appearance.	8
1.6	Inserimento di un sistema AOI nel processo di produzione.	11
1.7	I prodotti UltraVision, EasyVision e SuperVision (DCB Automation Limited).	13
1.8	Illustrazione del metodo di ispezione impiegato nei prodotti OMRON.	14
2.1	Logo del progetto 3DComplete.	16
2.2	Full 3D Inspection	17
2.3	Extended 2.5D Inspection	17
3.1	mvBlueCOUGAR-X.	28
3.2	Caratteristiche tecniche mvBlueCOUGAR-X.	28
3.3	Dimensioni mvBlueCOUGAR-X.	29
3.4	Specifiche sensore mvBlueCOUGAR-X	30
3.5	Moduli della libreria mvIMPACT.	31
3.6	Funzioni della libreria mvIMPACT Base.	31
3.7	Principi di funzionamento di diversi tipi di obiettivo.	32
3.8	Principio della triangolazione.	34
3.9	Z-Laser ZM18S.	35
3.10	Dimensioni (in mm) del Z-Laser ZM18S.	35
3.11	Disposizione videocamera-laser.	36
3.12	Triangolazione con 1 videocamera e 1 laser.	36
3.13	Triangolazione con 1 videocamera e 2 laser.	37
3.15	Sistema di movimentazione dell'oggetto ispezionato.	38
3.14	Triangolazione con 2 videocamera e 1 laser.	38
3.16	Mitsubishi Melfa.	39
3.17	Esempio di frame acquisito dal sistema definitivo.	40

3.18	Esempio di frame per l'acquisizione della sola linea laser.	41
3.19	Esempio di frame per l'acquisizione della texture 2D.	41
3.20	Prototipo del sistema di visione assemblato in laboratorio.	44
4.1	Schema funzionale del prototipo (a sinistra) e del sistema definitivo (a destra).	48
4.2	Schematizzazione dei movimenti del robot Melfa RV-2A per il prototipo del sistema di visione.	52
4.3	Set di immagini per la calibrazione.	54
4.4	Disposizione delle scacchiere nel sistema di riferimento della videocamera.	54
4.5	Modello della distorsione e risultati della calibrazione della videocamera con ottica 1:2.0/15mm.	55
4.6	Immagini utilizzate per la stima della direzione di avanzamento: la scacchiera ha una posizione fissa, mentre il sistema di visione viene spostato.	57
4.7	Risultato della detection della linea laser per un profilo.	60
4.8	Esempio di segmento linea laser e detection (in verde).	60
4.9	Detection della linea laser di Figura 4.8 (sopra), eliminazione degli outlier (al centro) e ricostruzione della linea (sotto).	62
4.10	Esempio eliminazione outlier sul profilo	63
4.11	Esempio di correzione della linea laser identificata.	64
4.12	Rappresentazione completa della triangolazione di un profilo laser.	66
5.1	Controllo qualità automatico.	71
5.2	Controllo qualità semi-automatico.	73
5.3	Controllo presenza guaina su scheda Cobra At.	76
5.4	Esito controllo presenza guaina gialla su scheda Cobra At.	76
5.5	Esito ricerca connettore su scheda Selcom.	77
5.6	Applicazione algoritmo RANSAC per l'estrazione dei punti di una superficie.	79
5.7	Controllo inclinazione connettore su scheda Selcom <i>corretta</i>	80
5.8	Controllo inclinazione connettore su scheda Selcom <i>difettosa</i>	81
5.9	Controllo dell'inclinazione del modulo GSM su scheda Cobra At <i>corretta</i>	82
5.10	Controllo dell'inclinazione del modulo GSM su scheda Cobra At <i>difettosa</i>	82
5.11	Correzione delle zone d'ombra per 3D Edge detection.	84
5.12	3D Edge detection: test su scheda fornita da Cobra At senza correzione delle zone d'ombra.	89
5.13	Schermata del programma <i>3DC ParamSet</i>	90
5.14	Configurazione sistema Tiered-Color Illumination.	91
5.15	Acquisizione di una saldatura priva di difetti con l'approccio Tiered-Color Illumination.	91
5.16	Difetti delle saldature e relative immagini "Tiered-Color Illumination".	92

Capitolo 1

Introduzione

Un'importante applicazione della visione industriale consiste nel controllo qualità e nella verifica, in particolare, della completezza dei prodotti assemblati (presenza/assenza di parti, tipo, della posizione, orientamento, ...). In Europa infatti ci sono circa 3000 piccole e medie imprese che operano nel campo della visione artificiale. Esse forniscono servizi e prodotti ad altre 300.000 PMI impegnate nel settore della costruzione di macchine e dell'automazione. Circa l'80% delle applicazioni di sistemi di visione industriale, sono relative al controllo di qualità, quali analisi 2D e 3D, *surface inspection* e *completeness inspection*. La completeness inspection, controllo di completezza, è una delle applicazioni basilari della visione artificiale. Si tratta di identificare l'oggetto, verificare la presenza di parti di tale oggetto, individuare componenti difettose e, talvolta, stimare posizione e caratteristiche di una componente. Sul mercato si trovano diversi prodotti che cercano di risolvere questo problema utilizzando tecnologie 2D. Tuttavia questi sistemi di ispezione della completezza in 2D risentono di gravi lacune che limitano le loro prestazioni e la loro robustezza.

Questo progetto mira a sviluppare efficaci sistemi 3D per il controllo di completezza tali che siano simili agli attuali sistemi di ispezione 2D in termini di velocità, facilità di utilizzo e integrazione, ma che offrano maggiori funzionalità.

1.1 Automated Optical Inspection

Il controllo qualità di produzioni in serie si avvale in molti casi di strumenti di ispezione ottica: si parla dunque di *Automated Optical Inspection (AOI)*. Tali strumenti acquisiscono in tempo reale immagini dei prodotti e le analizzano individuandone caratteristiche quali forma e dimensione, o la presenza di difetti ed errori di montaggio.

Strumenti che svolgono queste operazioni possono essere introdotti in diverse fasi del processo di produzione (nella catena di montaggio, o come controllo finale) e permettono di automatizzare compiti che solitamente sono lasciati all'operatore umano. La possibilità di automatizzare il controllo visivo di un prodotto rende l'operazione più veloce, ripetibile ed oggettiva, non soggetta, quindi, ad errori di distrazione. In questo modo si possono aumentare i ritmi produttivi e ridurre le

risorse di tempo e di personale impiegate nella verifica dei pezzi, limitandosi a gestire solamente i casi di effettiva presenza di difetti.

Per quanto detto finora, un software di ispezione ottica è in realtà un prodotto molto complesso. Deve essere in grado di elaborare velocemente immagini, può essere eventualmente dotato di un nucleo di intelligenza artificiale in grado di classificare le forme e deve identificare correttamente eventuali difetti. Un prodotto software di questo tipo, inoltre, per esprimere al meglio le proprie potenzialità deve essere considerato un vero e proprio strumento per il controllo e la gestione del processo produttivo. Può allora prevedere l'integrazione con software di gestione della produzione permettendo al supervisore di processo di monitorare i lotti di produzione, dalla presa in carico dell'ordine, al montaggio, fino al controllo finale di qualità.

L'integrazione di un tale software in un sistema di gestione della produzione comporta un costo non indifferente e prevede l'utilizzo di adeguati macchinari.

Un'alternativa più economica consiste nell'adozione di prodotti software e macchinari di ispezione ottica che lavorano indipendentemente dal processo produttivo, capaci di individuare difetti ed errori di montaggio senza necessitare di informazioni sul pezzo da controllare.

1.1.1 3D Completeness Inspection

La Completeness Inspection riveste oggi un ruolo fondamentale nel controllo di qualità. Sempre più vi è la necessità di verificare l'interezza di un prodotto finito, sia questo una scheda elettronica assemblata, un motore di automobile o un contenitore per la distribuzione di alimenti. In quest'ambito, sistemi di visione che riproducono modelli tridimensionali degli oggetti ispezionati presentano notevoli vantaggi rispetto ad un classico sistema di visione in 2D. La terza dimensione consente la soluzione di compiti altrimenti insoluti, quali l'individuazione di componenti dello stesso colore o parti non rigide.

1.2 Limiti dei sistemi 2D

I sistemi per il controllo di completezza esistenti fanno uso solitamente di telecamere 2D che forniscono un'immagine in bianco e nero o a colori. Queste immagini non hanno le informazioni di profondità e di conseguenza si introducono problemi quando si tratta di oggetti non rigidi o a basso contrasto tra sfondo e oggetto osservato e spesso non forniscono una visione ottimale su ogni singola parte del montaggio.

In particolare, i limiti dei sistemi 2D sono i seguenti:

- Non possono rilevare con precisione le parti che presentano caratteristiche di colore e riflessione simili allo sfondo, non potendo così riconoscere la presenza effettiva di tale parte. Questa applicazione trova ad esempio grande impiego nel settore automobilistico.
- A condizione che vi sia sufficiente contrasto con lo sfondo, i sistemi di ispezione 2D possono solo rilevare la presenza/assenza di una componente. Essi non

possono determinare se, ad esempio, una spina sia ben inserita o un componente elettronico sia complanare con la scheda elettronica su cui è montato.

- I sistemi di ispezione 2D generalmente presentano problemi in presenza di componenti non rigide, quali cavi o tubi, che possono cambiare la loro posizione andando così ad occludere in modo casuale la vista delle parti che devono essere ispezionate.

Tutti questi problemi sono causati dal fatto che tali sistemi non hanno le informazioni di profondità. Chiaramente ci sono una serie di "work-around", come l'utilizzo di un gran numero di telecamere, ma queste alternative non sono affatto efficienti e presentano costi proibitivi. Le applicazioni che non sono sufficientemente coperte dagli attuali sistemi di ispezione 2D (il mercato totale in Europa conta 700 milioni di euro) sono circa il 10% di tutte le funzioni di controllo di completezza. Il volume complessivo del mercato risulta quindi intorno ai 70 milioni di euro.

1.3 Sistemi 3D

In questa sezione verranno analizzate le componenti tecniche rilevanti per la 3D Completeness Inspection. Le tecnologie di interesse sono le seguenti:

- Sistemi di acquisizione per *3D shape*
- Sistemi di videocamere stereo
- Sistemi di acquisizione per *3D appearance*
- Algoritmi dedicati alla Completeness Inspection

Per chiarezza, è importante distinguere tra *3D shape* e *3D appearance*. Il primo metodo fornisce come risultati una nuvola di punti 3D ma non contiene informazioni relative al colore, mentre il secondo metodo fornisce entrambe le tipologie di dati.

1.3.1 Stato dell'arte

Le tecnologie impiegate oggi nell'ambito della visione 3D sono diverse e in continua crescita. Si riporta nel seguito una tabella riassuntiva delle tecnologie più consolidate e diffuse con una descrizione delle caratteristiche e dei rispettivi limiti.

Tecnologia	Limitazioni
2D Completeness Inspection	Risente della mancanza delle informazioni di profondità. I controlli non sono possibili in situazioni di basso contrasto, non potendo distinguere, ad esempio, una parte di oggetto dallo sfondo. Presenta problemi con oggetti non rigidi.
Laser profile scanner	Fornisce solamente informazioni di profondità. Non può quindi essere impiegata per verificare la presenza di una etichetta o di un codice a barre. Funzioni, queste, spesso richieste nell'ambito della Completeness Inspection.
Time-of-flight Camera	La risoluzione non è sufficiente. Le videocamere attualmente impiegate sono limitate a 204x204 pixel per le informazioni di profondità. Non sono quindi adeguate per la scansione di oggetti di dimensioni consistenti.
Appearance-based scanner (ZScanner)	Sono progettate per ottenere una elevata precisione nelle misurazioni. Sono generalmente composte da un supporto rigido per videocamera e scanner di profilo. Non sono quindi adattabili a molte applicazioni e sono costose.
Stereo camera system	Presenta il problema di dover identificare automaticamente i punti corrispondenti nelle immagini. Il calcolo del modello 3D richiede tempi eccessivi.
Pattern matching algorithms	Sono focalizzati sulle informazioni 2D e adottano robusti algoritmi di correlazione. Tali algoritmi non considerano ad esempio le caratteristiche aggiuntive date dalle informazioni 3D nei modelli ottenuti mediante 3D appearance.

1.3.2 Acquisizione di 3D shape

Laser scanner a triangolazione

Uno scanner laser che sfrutta la triangolazione è uno scanner attivo che utilizza la luce laser per sondare la forma dell'ambiente.

Un emettitore proietta una linea laser e tramite una videocamera si analizza la posizione del laser sulla superficie di un oggetto. Vengono impiegate lenti specifiche per creare una linea laser collimata, o in alternativa ma più raramente impiegato, un singolo punto che tramite specchi rotanti si proietta nei diversi punti della superficie. L'acquisizione completa di un oggetto richiede una serie di letture successive di singoli profili mentre l'oggetto o lo scanner sono in movimento. I profili vengono poi elaborati

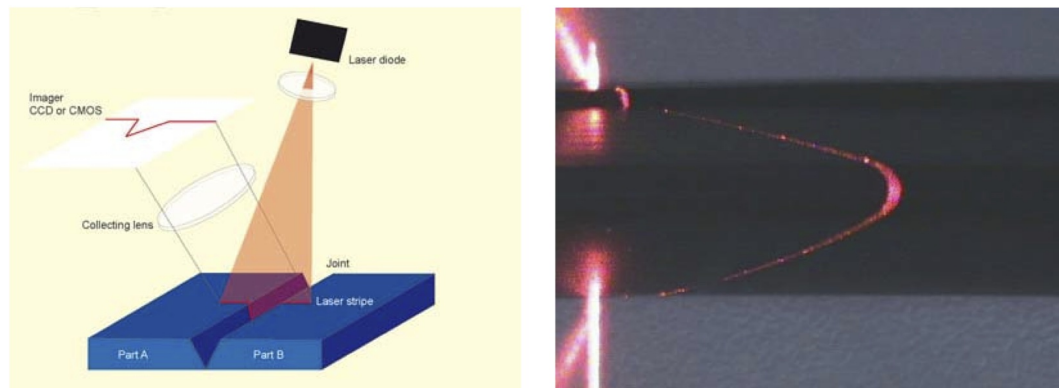


Figura 1.1: Configurazione per la triangolazione laser (sinistra). Effetto di una linea laser proiettata su una superficie curva (destra).

per ricavare le misure reali. L'impiego della videocamera richiede una fase preventiva di calibrazione del sistema. Il National Research Council del Canada è stato il primo istituto a sviluppare tecniche per la triangolazione basate sulla scansione laser nel 1978. [3]

Gli scanner basati sulla triangolazione del laser presentano un range di azione di alcuni metri, ma l'accuratezza può arrivare fino all'ordine di alcune decine di micrometri a seconda del campo di vista. Sul mercato sono presenti vari dispositivi che differiscono per risoluzione e velocità di acquisizione. Alcuni esempi sono i prodotti delle ditte SICK/IVP e Micro-Epsilon. Alcuni scanner sono già calibrati e forniti con una configurazione fissa di videocamera e laser, ma presentano un campo di vista predeterminato. La velocità di questi sistemi arriva fino a 5000 profili per secondo. [4, 5]

Il principio della triangolazione viene utilizzato anche in sistemi di misurazione 3D che usano sorgenti di luce strutturate. Invece di una singola linea, tali sistemi proiettano un pattern formato da più linee parallele, in alcuni casi in movimento per sfruttare anche le informazioni di fase. Questo consente una buona precisione nelle misurazioni. Il vantaggio principale offerto dalla proiezione di un pattern di luce risiede nel fatto che non è necessario movimentare la videocamera. Per contro, sono richiesti specifici generatori di luce strutturata. Grazie alla elevata intensità della luce laser generata, gli scanner hanno una elevata capacità anche nell'acquisizione di superfici riflettenti o scure. La velocità di acquisizione dei sistemi a luce strutturata è paragonabile a quella ottenuta con gli scanner laser.

Light Detecting and Ranging (LIDAR)

Il principio di funzionamento del LIDAR consiste nell'emettere una luce e calcolare il tempo da essa impiegato per arrivare all'oggetto ed essere riflessa di nuovo al sensore. LIDAR si basa sulla riflessione di impulsi di luce laser e viene impiegato, ad esempio, per la scansione del suolo terrestre riuscendo a coprire un range di diverse centinaia di metri. [6] Generalmente questi scanner possono gestire un solo punto per volta,

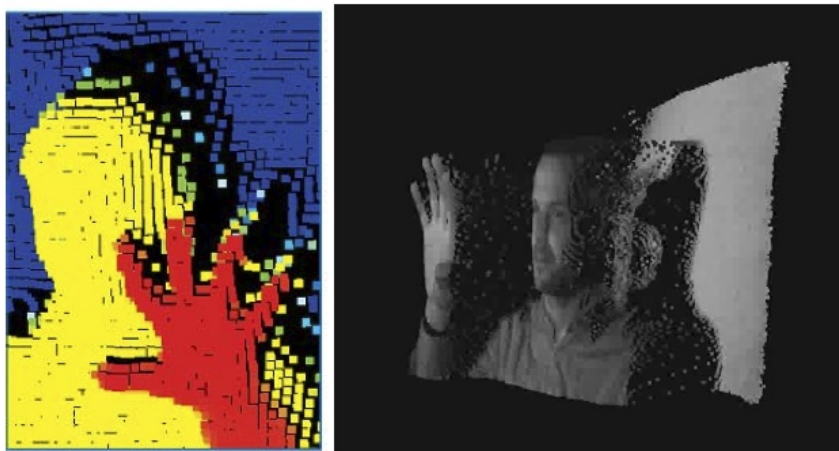


Figura 1.2: Immagine di profondità ottenuta con una videocamera ToF. La bassa risoluzione limita le informazioni estraibili dall'immagine.



Figura 1.3: La CamCube prodotta da PMD[vision]®.

ma recentemente sono stati sviluppati sensori in grado di gestire una mappa di punti fornendo in output l'immagine di profondità. Il principio di queste videocamere, dette "*time of flight*" (*ToF*) consiste nel misurare il cambio di fase del segnale in RF della luce laser che ritorna al sensore. Questo, tuttavia, limita la portata massima che può essere determinata dalla lunghezza d'onda del segnale portante. Il problema può essere in parte risolto con algoritmi in grado di modulare la fase della luce emessa. La risoluzione di queste videocamere è molto bassa, i valori tipici sono 64x48 pixel, 176x144 pixel, e sviluppi più recenti arrivano a 204x204 pixel. [7, 8]

Un esempio dello stato dell'arte per le videocamere ToF è rappresentato dalla CamCube, prodotta da PMD[vision]®. Essa ha una risoluzione di 204x204 pixel e una velocità di 25 fps. Il sensore della camera, inoltre, è in grado di identificare il colore. La distanza minima affinché il pattern di luce si ripeta deve essere superiore agli 8 metri. La CamCube dispone inoltre di un circuito chiamato SBI (Suppression of Background Illumination) che rende possibile l'utilizzo della camera anche in ambienti outdoor, in presenza quindi della luce solare. [7]

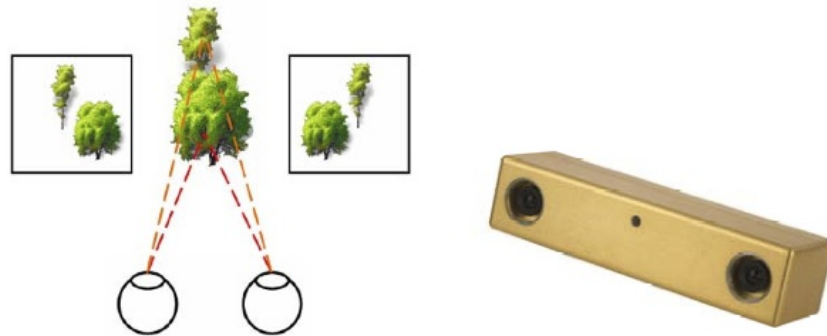


Figura 1.4: Percezione della vista umana (sinistra) e una sua implementazione con un sistema di videocamere *binocular stereo* (“Bumble Bee 2” della ditta PointGray Inc.) (destra).

Limiti nell’acquisizione di 3D shape

In riferimento alle applicazioni tipiche della 3D Completeness Inspection, le tecnologie basate su 3D shape presentano alcune limitazioni sostanziali:

- gli scanner dei profili 3D non forniscono le informazioni di colore. Non consentono quindi il controllo di presenza/assenza di oggetti piatti quali etichette o la lettura di caratteri e codici a barre, funzioni spesso richieste nei sistemi nell’ambito della Completeness Inspection.
- le videocamere ToF presentano una risoluzione insufficiente. Anche alla risoluzione di 204x204 pixel, vengono perse molte informazioni essenziali. Non permettono ad esempio il controllo di un singolo cavo in un ampio campo di vista.

1.3.3 Videocamere stereo

Un problema fondamentale della Computer Vision è lo stereo matching che mira a ricostruire la struttura geometrica a partire da un set di immagini. In questo campo sono attive aree di ricerca che hanno avuto progressi consistenti negli ultimi anni. I primi approcci si sono limitati all’impiego di due sole immagini, caso conosciuto come *binocular stereo*. L’obiettivo è quello di determinare i pixel corrispondenti per ogni coppia di immagini e calcolare una mappa di disparità.

La ricerca delle corrispondenze è limitata all’associazione di linee nelle diverse immagini. Le dimensioni della base di riferimento (distanza tra i diversi punti di vista) e della costruzione della struttura danno luogo ad un trade-off tra accuratezza geometrica e robustezza alle occlusioni. In molti casi gli algoritmi impiegati danno luogo a soluzioni approssimate, cercando di minimizzare determinate funzioni di costo.

Due punti di vista differenti sono sufficienti per l’estrazione delle informazioni di profondità, utilizzando però più immagini si possono ottenere risultati più precisi. Si



Figura 1.5: Sistema di acquisizione per il 3D appearance.

parla allora di algoritmi classificati come *multi-view stereo*. Queste tecniche possono essere impiegate per ottenere migliore qualità delle mappe di profondità o per creare accurati modelli 3D associando le mappe per definire le caratteristiche di volume e rappresentazione della superficie [10]. L'impiego di più immagini consente di evitare molte occlusioni: una regione occlusa solo in una immagine può comunque essere visibile dagli altri punti di vista.

Limiti delle videocamere stereo

Le videocamere stereo rappresentano una tecnologia molto simile ad uno dei due approcci che si intende sviluppare all'interno del progetto 3DComplete, come vedremo in seguito.

Ci sono però due questioni che devono essere affrontate e risolte:

- per ottenere le informazioni di profondità con i sistemi di videocamere stereo, è necessaria una fase di identificazione dei punti corrispondenti in più immagini. Questo processo è complicato ed introduce spesso errori in presenza di zone d'ombra o di variazioni di luminosità. Esistono già diversi metodi, ma questi devono essere ulteriormente sviluppati e adattati per ottenere la robustezza richiesta per un loro impiego nei processi industriali.
- Solitamente la costruzione di un modello 3D appearance a partire da un set di immagini 2D richiede troppo tempo, in particolare se si vuole ottenere la risoluzione necessaria all'impiego dei modelli nella 3D Completeness Inspection.

1.3.4 Acquisizione di 3D appearance

La ricostruzione di un modello 3D fedele di un dato oggetto trova impiego in diverse aree dell'ingegneria e non solo. In questi casi si vuole digitalizzare un oggetto, riproducendone simultaneamente forma e colori. In questo campo si punta soprattutto alla precisione nelle misure. La risoluzione arriva fino ai 50 μm per un campo di vista di 20 cm (vedi ZScanner 800 prodotto da ZCooperation). [10]

I diversi prodotti usano tutti procedure simili. In primo luogo lo scanner deve acquisire interamente l'oggetto di interesse. La maggior parte degli scanner sono portatili e consentono l'acquisizione da punti di vista casuali. Maggiori saranno le viste acquisite, maggiore sarà la completezza del modello cercato.

Le acquisizioni richiedono una fase di preparazione. Ad esempio, per l'utilizzo dello ZScanner l'oggetto deve essere prima dotato di alcuni target, punti di riferimento, usati poi in fase di elaborazione per calcolare la posizione effettiva della videocamera. Altri sistemi, invece, richiedono soltanto che l'oggetto sia posto sopra uno sfondo dotato di specifici marcatori, come ad esempio lo ZSnapper della Vialux [12]. In questo modo non è necessario intervenire direttamente sull'oggetto.

La fase di scansione estrae una nuvola di punti che descrive la forma dell'oggetto e le immagini 2D corrispondenti. In seguito viene calcolata la triangolazione sulla nuvola di punti e viene associata la texture in ogni punto.

Limiti nell'acquisizione di 3D appearance

Questa tecnologia è certamente di interesse nell'ambito della 3D Completeness Inspection, ma i prodotti presenti sul mercato sono focalizzati sull'ottenimento di elevate risoluzioni e di conseguenza non sono adatti a far fronte ad una vasta scala di oggetti, che variano per dimensioni e complessità. Inoltre la scansione richiede l'applicazione di marcatori sull'oggetto o nello sfondo e questo aspetto limita le possibili applicazioni nella Completeness Inspection. Tuttavia questa tecnologia merita di essere ulteriormente approfondita. Il costo di un sistema basato sulla triangolazione laser ammonta a 33.500 € circa, ed è quindi ancora molto elevato.

1.3.5 Algoritmi per la Completeness Inspection

La Completeness Inspection è impiegata per rilevare la presenza di un oggetto o la tipologia cui esso appartiene, rilevare la posizione di un oggetto o ancora controllare la presenza di difetti in alcune sue parti. Sono frequentemente incluse anche la lettura di codici a barre e la digitalizzazione di caratteri. Di questi ultimi due aspetti non ci occupiamo in quanto non sono applicabili ai dati tridimensionali.

L'analisi della completezza viene eseguita sui modelli dei singoli oggetti. Comunque si usa acquisire innanzitutto un oggetto già analizzato dall'occhio umano e di cui si abbia la certezza della sua integrità e dell'assenza di difetti. Tale modello viene considerato come Master e tutti i modelli successivamente acquisiti vengono confrontati con questo. Generalmente si devono specificare manualmente le regioni che si intende analizzare. Dal confronto tra la regione del modello Master e del modello successivamente acquisito è possibile rilevare la mancanza di componenti o eventuali difetti.

Gli algoritmi si differenziano per il modo in cui eseguono il controllo tra una parte del modello master e la corrispondente nel modello da esaminare. La tecnica di base consiste nel fare un confronto pixel a pixel. Questa però funziona solo in assenza di variazioni di luminosità, dove invece si può impiegare come metodo di confronto la correlazione semplice, che è invariante a trasformazioni lineari della luminosità. E' inoltre consigliabile allineare il modello corrente col master prima di eseguire le verifiche di completezza. Questa fase può essere eseguita localmente sulle singole regioni di interesse o globalmente, cioè adattando i modelli nella loro completezza. A tal scopo esistono diversi metodi che possono essere impiegati: essi si differenziano per

velocità di elaborazione e per la possibilità di compensare anche movimenti rotatori. Generalmente si impiegano metodi semplificati perché la completeness inspection viene eseguita in ambienti controllati dove si conoscono a priori il posizionamento degli oggetti, quindi questa fase si riduce solitamente al calcolo di una traslazione di pochi pixel.

Un altro aspetto che deve necessariamente essere preso in considerazione consiste nelle variazioni di illuminazione, anche piccole, che causano variazioni di ombra [13] (si ripercuotono sulla bontà degli algoritmi di correlazione) e possono introdurre anche variazioni di colore non volute [14, 15], che sono rilevanti nel caso l'ispezione richieda informazioni di colore. Anche in questo campo, sono stati sviluppati algoritmi che risolvono il problema sia facendo uso di tecniche di *background subtraction* [16] sia per mezzo di altri filtri [17]. Come concetto generale, vi è un trade-off tra la costruzione di algoritmi di detection sufficientemente robusti, indipendenti da traslazione e rotazione, variazioni di luminosità e colore e in presenza di rumore, pur facendo in modo che tale algoritmo sia ancora in grado di individuare le deviazioni del modello ispezionato da quello master (parte sbagliata, pezzo difettoso, falsa posizione o orientamento, ...).

In ambito 3D la localizzazione e l'identificazione degli oggetti risultano molto più complesse. Un oggetto in una scena può essere identificato tramite il confronto della sua superficie con le caratteristiche di superficie di un dato oggetto già memorizzato. Molte tecniche fanno uso di rappresentazioni locali per modellare la superficie in un intorno sufficientemente grande di ogni punto. Applicando poi tecniche di matching su queste rappresentazioni locali si può bypassare la fase di segmentazione nel processo di identificazione dell'oggetto. Altre tecniche invece sono basate sulla rappresentazione globale della forma di un oggetto (global shape descriptor). La stima della similarità risulta dal confronto tra le rappresentazioni globali degli oggetti, tecniche in genere invarianti alle trasformazioni rigide.

Limiti degli algoritmi per la Completeness Inspection

Gli algoritmi per la completeness detection devono essere estesi e adattati nei seguenti due aspetti:

- Le proiezioni ottenibili da un set di immagini 2D contengono pixel provenienti da più immagini. Ognuna di queste immagini è presa, anche se di poco, in condizioni differenti di illuminazione, che possono introdurre quindi disturbi e bordi supplementari, assenti invece nelle singole immagini 2D delle videocamere. Occorre sviluppare metodi che siano invarianti a questo tipo di rumore, combinando le informazioni di forma con quelle di colore per distinguere i bordi introdotti dalle ombre con quelli 3D reali dell'oggetto.
- Gli algoritmi di localizzazione e identificazione di oggetti nell'ambito 3D sono flessibili e danno buoni risultati, ma per contro richiedono tempi di esecuzione eccessivi. Per l'applicazione nel campo Extended 2.5D, di interesse per il progetto 3DComplete, gli algoritmi devono essere adattati con metodi più efficienti. Di particolare rilevanza sarà l'invarianza a traslazione e rotazione con 6

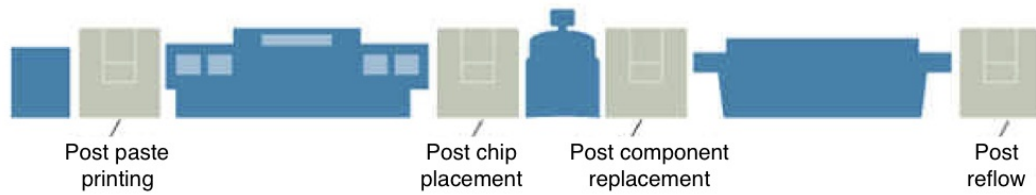


Figura 1.6: Inserimento di un sistema AOI nel processo di produzione.

gradi di libertà e una combinazione delle tecniche di matching su modelli globali e locali per eseguire controlli sulle parti di interesse di un oggetto. Questo ci permetterà di rilevare se ad esempio una spina sia ben inserita, compensando le variazioni di allineamento degli oggetti e le loro componenti non rigide.

1.4 I sistemi AOI per il controllo di PCB

Nel mercato si trovano diverse tipologie di sistemi AOI. Si va dal semplice scanner o sistemi di confronto, a sistemi completamente automatizzati.

I sistemi possono eseguire una ispezione 2D oppure 3D. I sistemi 2D utilizzano solitamente una videocamera accoppiata ad un particolare metodo di illuminazione, e consentono una veloce ispezione per quasi tutti i difetti, ad eccezione ad esempio del volume della pasta, delle forme e inclinazioni. Difetti, questi, che possono invece essere identificati con sistemi 3D, i quali impiegano videocamere o altri metodi che forniscono informazioni riguardo volume e forma.

I sistemi di confronto utilizzano immagini precaricate di un campione corretto e ne fanno il confronto con le immagini del PCB di test, evidenziandone le differenze per identificare i difetti. Questi sistemi sono pratici da utilizzare e generalmente non richiedono una configurazione iniziale. Per contro, presentano qualche limitazione e non consentono una ispezione nei minimi dettagli.

Sistemi più sofisticati e maggiormente costosi incorporano videocamere ad alta risoluzione con componenti software che consentono una ispezione completa di PCB assemblate.

Per quanto riguarda le schede elettroniche, le tecniche di AOI possono essere impiegate in diverse fasi della produzione per prevenire o solo identificare i problemi. La figura 1.6 illustra come l'utilizzo di tecniche AOI può essere integrato dopo la fase di stampa del PCB e posizionamento della pasta saldante sulle piazzole, dopo il posizionamento dei chip o dei componenti per la prevenzione, oppure dopo la fase di saldatura per rilevare eventuali problemi.

Di seguito viene illustrato come può essere utilizzata l'AOI nelle quattro fasi:

1. Dopo il posizionamento della pasta: la maggior parte dei difetti di saldatura derivano da una incorretta applicazione della pasta. Dopo aver applicato la pasta, molti sistemi 2D possono verificarne il corretto posizionamento orizzontale-verticale, se essa copre l'intera area disponibile, la sua distribuzione o la mancanza. Sistemi 3D ne consentono anche la misura del giusto volume.

2. Dopo il posizionamento dei chip: l'ispezione può controllare la presenza dei chip, il corretto piazzamento e l'orientazione.
3. Dopo il posizionamento dei componenti: l'ispezione può controllare la presenza/ assenza dei componenti, l'allineamento e la polarizzazione.
4. Dopo la saldatura: l'ispezione può nuovamente essere impiegata per controllare la presenza/assenza dei componenti, il corretto posizionamento, l'allineamento e la polarità, ma deve anche verificare la correttezza delle saldature, la mancanza di stagno, la presenza di cortocircuiti o il sollevamento dei componenti.

1.4.1 I sistemi presenti sul mercato per l'ispezione di schede elettroniche

PCB Checker (Eulogika)

In collaborazione con *Reitex s.r.l.*, *Eulogika* ha sviluppato il software di ispezione ottica *PCB Checker*, nucleo di calcolo dell'omonimo macchinario per il controllo qualità nel processo di montaggio di schede elettroniche.

PCB Checker è in grado di riconoscere se i componenti elettronici di un circuito stampato sono stati montati correttamente in fase di produzione.

Difetti del pezzo, quali componenti assenti, montati in modo errato o parziale, vengono segnalati all'operatore. Eventuali situazioni limite di incertezza vengono individuate per essere risolte dall'esperienza di un tecnico addetto e, tramite il nucleo di intelligenza artificiale che fornisce procedure di apprendimento, assimilate dal software per aumentarne la precisione. *PCB Checker* è inoltre nativamente integrabile con "Charlot", il software di gestione della produzione, sempre prodotto da *Eulogika*.

UltraVision, EasyVision e SuperVision (DCB Automation Limited)

Sistemi di AOI per controllo di schede elettroniche che usano telecamere e un proprio metodo di illuminazione volto ad evidenziare i difetti delle saldature.

I sistemi in vendita eseguono i seguenti controlli:

- *Controllo della polarità*: Utilizza un innovativo sistema di illuminazione e pattern recognition per garantire che tutti i componenti siano correttamente polarizzati.
- *Controllo di posizione*: Utilizza una maschera e algoritmi di pattern matching per il controllo della posizione e rotazione dei componenti sulla scheda.
- *Controllo del codice dei componenti*: Usando una combinazione di OCV e OCR e riconoscimento del colore (tonalità, saturazione e luminanza) il sistema può verificare la marcatura e la codifica a colori di ogni componente.
- *Ispezione delle saldature*: Esegue controlli sulla correttezza delle saldature basandosi sulla variazioni di colore ottenute con un apposito sistema di illuminazione a zone.

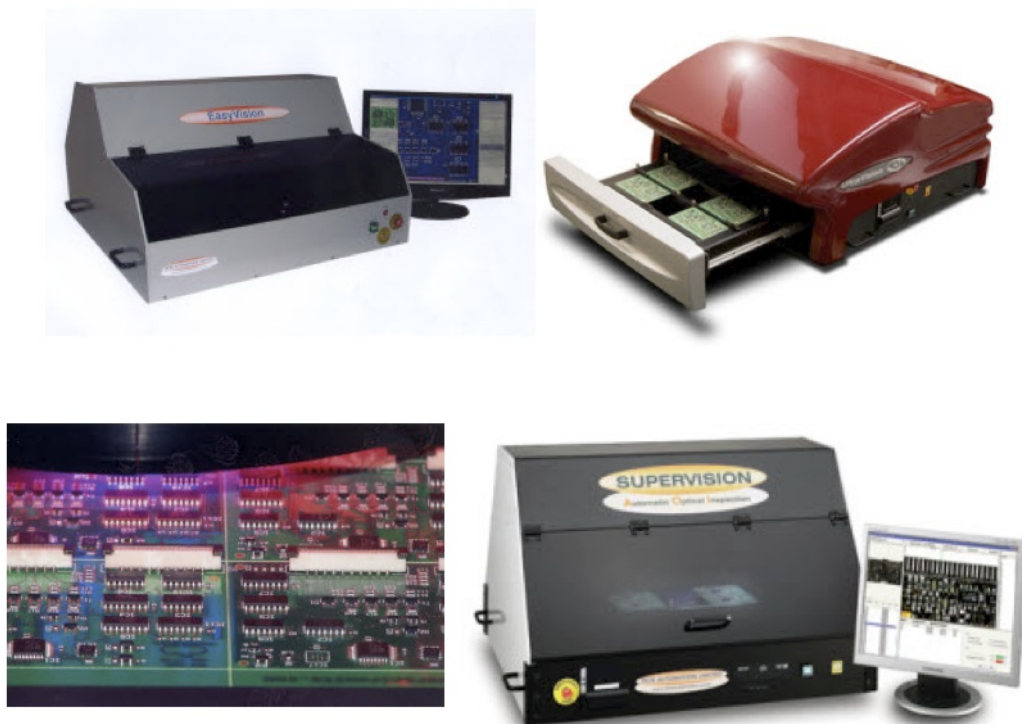


Figura 1.7: I prodotti UltraVision, EasyVision e SuperVision (DCB Automation Limited).

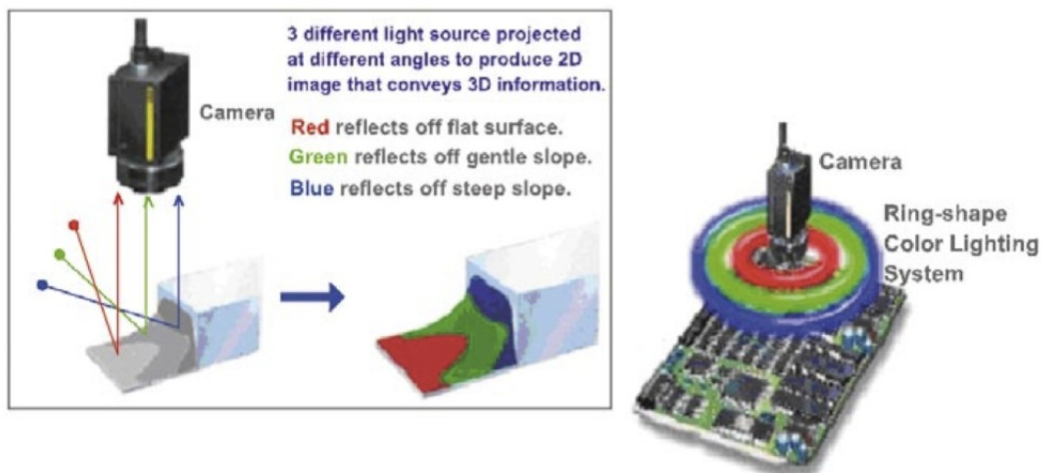


Figura 1.8: Illustrazione del metodo di ispezione impiegato nei prodotti OMRON.

OMRON Automated Optical Inspection

OMRON fornisce diverse macchine per l'ispezione ottica di PCB. In particolare utilizza una propria tecnica di illuminazione con sorgenti di tre differenti colori poste con diverse inclinazioni che consentono di identificare le diverse pendenze che formano le saldature dei componenti sulle piazzole delle schede. È stato possibile così utilizzare un sistema di visione 2D per ottenere informazioni tridimensionali. Nella figura 1.8 viene illustrato il metodo impiegato.

Capitolo 2

Progetto *3DComplete* - Efficient 3D Completeness Inspection

2.1 Introduzione

Analisi statistiche su prodotti tecnologici, per esempio dal settore delle automobili ai telefoni cellulari, mettono in risalto il numero sempre crescente di prodotti ritirati perché difettosi. Questo richiama i temi della qualità e della sicurezza ponendo l'attenzione sempre più verso il consumatore. Causa del rapido progresso tecnologico, i prodotti diventano sempre più complessi, per cui anche la potenziale fonte di errori aumenta. Date queste situazioni, l'istituto di ricerca Austriaco, in collaborazione con altri cinque partner internazionali tra cui l'Università di Padova, intende sviluppare col progetto europeo "*3DComplete*" un innovativo sistema di ispezione della qualità.

Il progetto *3DComplete* ha come obiettivo la realizzazione di efficaci tecnologie in grado di ricostruire modelli 3D di oggetti, ai quali applicare successivamente metodologie per il controllo di completezza.

Il progetto è finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del *7th Framework Programme*.

Il lavoro di tesi seguirà la parte iniziale di questo progetto, il cui termine è fissato per agosto 2012. Tale lavoro prevede la progettazione e la realizzazione di un sistema di visione industriale, conforme alle linee definite dal progetto, che sia in grado di associare a immagini 2D, catturate mediante una comune videocamera, informazioni tridimensionali in ogni suo punto per ottenere così un modello tridimensionale completo di texture.

Con l'attività di tesi, all'interno di questo progetto ho collaborato alla realizzazione hardware del sistema di visione, ho implementato la laser detection, effettuato le acquisizioni e ideato gli algoritmi di controllo qualità.

2.2 Tecnologie 3D

Il progetto *3DComplete* mira allo sviluppo di sistemi di controllo automatizzati per il 3D Completeness Inspection, completi di videocamere, illuminatori e software di



Figura 2.1: Logo del progetto 3DComplete.

gestione ed elaborazione. Si vuole inoltre creare una soluzione che sia efficiente e competitiva in termini di prezzo, velocità di acquisizione ed elaborazione e allo stesso tempo semplice da installare e configurare. Mantenendo queste idee, gli sviluppi si focalizzano su due tecnologie. La prima è basata sul calcolo di un numero arbitrario di viste di un oggetto a partire da un numero limitato di immagini, la seconda mira invece a combinare dati di forma 3D con informazioni di texture. Entrambe le tecnologie dovranno coprire l'intero processo di ispezione, dall'acquisizione dei dati e la loro pre-elaborazione fino alla decisione finale. Essi dovranno essere sviluppati mediante l'utilizzo di hardware standard per creare una soluzione efficiente che sia allo stesso tempo economica.

Nel seguito verranno meglio illustrate le due tecnologie considerate.

2.2.1 Full 3D Inspection

Il metodo deve consentire lo sviluppo di un numero arbitrario di viste, costruite come ortoimmagini, a partire da poche immagini di un oggetto acquisite da diversi punti di vista e inclinazioni. Le ortoimmagini che si vogliono ottenere sono scelte al fine di ottimizzare i risultati nella verifica della completezza delle componenti dell'oggetto.

Senza dover disporre di molte videocamere si possono così ottenere immagini simili a disegni tecnici estesi con informazioni di colore.

Nella figura 2.2 viene rappresentato un possibile risultato ottenuto con tale metodo di visione.

2.2.2 Extended 2.5D Inspection

La tecnologia 2.5D consiste nell'associare ad immagini bidimensionali, a colori o in bianco e nero, le misure di profondità costituite da nuvole di punti. Tali informazioni 3D dovranno essere acquisite mediante l'utilizzo di un scanner di profili a laser. Si ha così un'estensione delle informazioni a disposizione che può sopperire ai problemi tipici dei sistemi di ispezione 2D. Dalla nuvola di punti si può generare un'immagine i cui colori sono rappresentativi della profondità in ogni punto dell'oggetto: questa immagine rappresenta la forma dell'oggetto e viene chiamata 2.5D o immagine di Range.

La figura 2.3 illustra i passi richiesti per la costruzione del modello mediante l'utilizzo della tecnologia Extended 2.5D.

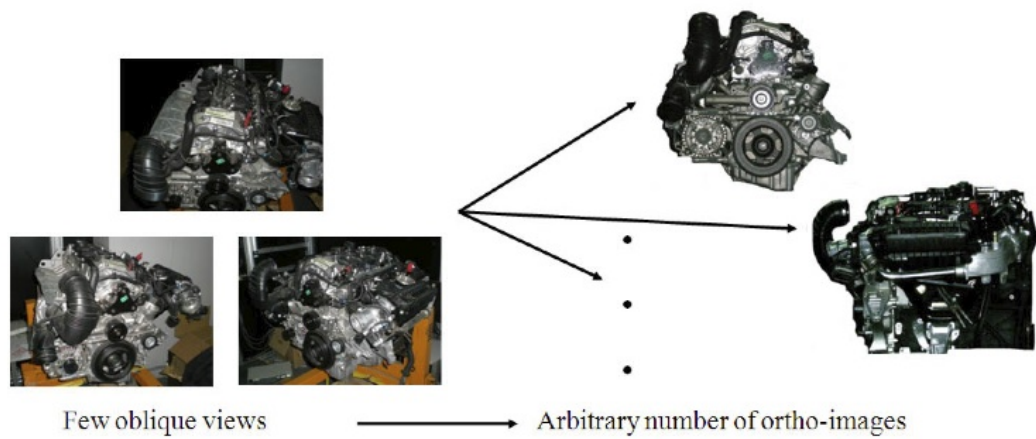


Figura 2.2: “Full 3D”: combinazione di alcune immagini per ottenere un numero arbitrario di ortoeffetti adatte all’ispezione delle singole parti dell’oggetto.

2.5D Shape Scanner + 2D image data = Extended 2.5D

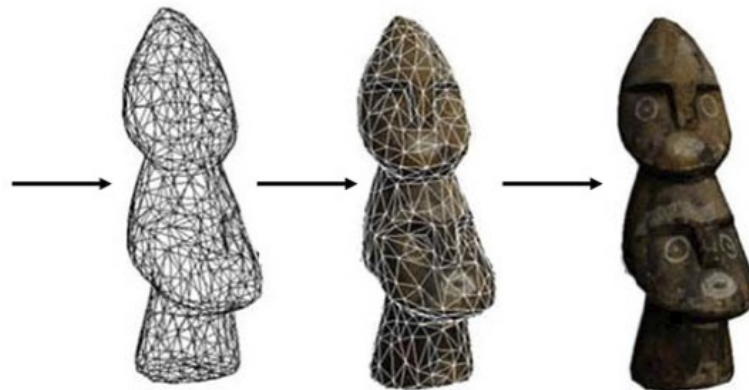


Figura 2.3: “Extended 2.5D”: combinazione della nuvola di punti 3D con le informazioni di texture di immagini 2D in bianco e nero o a colori.

2.3 Specifiche

Questo progetto mira a sviluppare sistemi di controllo 3D che presentino le stesse caratteristiche degli attuali sistemi di ispezione 2D in termini di velocità, facilità di utilizzo e integrazione, ma che offrano maggiori funzionalità. Gli obiettivi principali sono dunque i seguenti:

- sviluppare un sistema per il controllo di completezza mediante la tecnologia Full 3D utilizzando il minimo numero di viste, non calibrate, di un oggetto e da queste ottenere un numero arbitrario di ortoimmagini adatte alle ispezioni richieste. La ricerca in questo ambito si focalizza sui seguenti argomenti:
 - metodi efficienti per l’acquisizione di un set di immagini 2D in alta risoluzione sia mediante l’utilizzo di più videocamere sia sfruttando il movimento dell’oggetto;
 - metodi automatici per la conversione delle immagini acquisite in un set di ortoimmagini;
 - metodi per la completeness inspection sulle ortoimmagini che sfruttino le caratteristiche dei modelli così ottenuti.
- sviluppare un sistema per il controllo di completezza mediante la tecnologia Extended 2.5D combinando un generatore di luce laser con una videocamera 2D per ottenere la forma dell’oggetto e le informazioni di colore. Gli argomenti che meritano più attenzione su cui ci si focalizzerà sono i seguenti:
 - metodi di calibrazione combinata per la videocamera 2D e lo scanner di profili 3D;
 - algoritmi per mappare le informazioni di texture 2D con i dati 3D;
 - metodi per la completeness inspection su dati composti da una nuvola di punti 3D e relative informazioni di colore.

Le specifiche tecniche che entrambe le tecnologie dovrebbero raggiungere sono orientate al loro impiego come sistemi di ispezione posti alla fine della linea di produzione. I requisiti sono scelti in modo da coprire una vasta gamma di applicazioni nel settore dei sistemi di controllo discreti:

- il tempo di ciclo totale per l’ispezione dovrebbe ricadere nel range tipico di 2-20 secondi, che in casi estremi può arrivare a 0,5 secondi o fino a 1 minuto;
- lo spazio utile per l’ispezione deve essere scalabile da 3x3x2 cm (dimensioni di una scheda elettronica per cellulari) fino ad un massimo di 1x1x1 m (circa le dimensioni di un motore per automobili);
- l’acquisizione dovrebbe essere il più possibile flessibile per adattarsi al meglio alle diverse geometrie degli oggetti di cui è richiesta l’ispezione (per evitare eventuali occlusioni);

- per il Full 3D la risoluzione del sistema deve essere superiore ai 1500 pixel in tutte le dimensioni, così da permettere l'integrazione di funzionalità quali il riconoscimento dei caratteri e la lettura di codici a barre;
- per l'ambito Extended 2.5D è richiesta una risoluzione non inferiore ai 1500 pixel lateralmente e di almeno 1/256 della profondità da coprire per i dati 3D.
- i costi di produzione per entrambi i sistemi di visione devono essere inizialmente minori di 10.000 €, così da permettere un prezzo del prodotto finito di circa 15.000 €.

2.4 Obiettivi

3DComplete vuole inserirsi in due settori importanti: da un lato si vogliono sostituire i sistemi di ispezione esistenti (che utilizzano molte videocamere e hanno costi elevati) con un sistema più economico che fa uso di un numero limitato di videocamere standard; dall'altro si intende offrire delle soluzioni a problemi nel campo dell'ispezione che a tutt'oggi non sono stati risolti per questioni tecniche o per ragioni economiche.




I campi di applicazione a cui puntano le soluzioni cercate sono differenti: il Full 3D è richiesto per la modellizzazione di oggetti complessi, quali ad esempio il motore di un'auto, mentre l'Extended 2.5D trova impiego nell'ispezione di oggetti più o meno piani, come le schede elettroniche.

2.5 I partner

Il progetto nasce dalla volontà congiunta di diverse aziende di sviluppare nuove tecnologie per il controllo qualità che sopperisca alle mancanze gli attuali sistemi. I partner sono aziende/enti di ricerca già impegnati nel settore della ricerca e sviluppo. Ogni partner contribuirà con la propria esperienza e svilupperà principalmente gli argomenti in cui ha maggiori conoscenze.

Si riporta nel seguito una tabella descrittiva dei partner e della distribuzione dei compiti nell'ambito del Progetto 3DComplete.

Partner	Descrizione
 PROFACTOR	<p>PROFACTOR GmbH</p> <p>centro di ricerca Austriaco con sede a Steyr focalizzato sullo sviluppo di nuove tecnologie. Il settore di machine vision è impegnato da lungo tempo nello sviluppo di sensori intelligenti basati sulla computer vision per il monitoraggio di processi automatici e semi-automatici. PROFACTOR è il coordinatore del progetto, responsabile dello sviluppo di algoritmi per la completeness inspection per la tecnologia Full 3D ed Extended 2.5D.</p>
 metria	<p>Metria Digital S.L.</p> <p>è una innovativa PMI specializzata in servizi di fotogrammetria close-range, basati su tecnologie proprietarie. Un campo questo, in cui è considerata un punto di riferimento spagnolo a livello nazionale. Metria è responsabile per la generazione di ortofotografie che rappresentino una proiezione ortogonale dell'oggetto, simili a disegni tecnici, ma estesi con informazioni di colore e texture a partire da un set di immagini acquisite da diversi punti di vista.</p>
 IT+Robotics	<p>IT+Robotics s.r.l.</p> <p>è una spin-off dell'università di Padova. È stata creata nel 2005 da professori impegnati nell'ambito della robotica e da giovani e brillanti persone provenienti dal Dipartimento di ingegneria dell'informazione dell'Università di Padova. L'obiettivo consiste nel trasferire al mondo del lavoro le capacità tecnologiche fornite dall'Università. In particolare, IT+Robotics fornisce competenze nei settori: sistemi di visione artificiale, sistemi operativi real-time, software e simulazioni altamente realistiche. IT+Robotics è responsabile per la realizzazione di un sistema di ispezione per l'Extended 2.5D ottenuto combinando in modo innovativo un laser profile scanner e una videocamera a colori.</p>

Partner	Descrizione
	<p>Ardoran</p> <p>è un PMI estone stabilita nel 2001 e focalizzata sull'ICT (Information and Communication Technology) e nel settore dell'elettronica. L'azienda è interessata ai risultati del 3DComplete come soluzione per l'ispezione e il controllo qualità dei propri prodotti elettronici. I prodotti comprendono navigatori GPS portatili e dispositivi per la comunicazione dati e voce. Ardoran sarà responsabile per la definizione dei requisiti e parteciperà alle fasi di realizzazione del prototipo e di test.</p>
	<p>Fundacion Prointec</p> <p>è un centro tecnologico il cui obiettivo è quello di migliorare la competitività dei propri clienti, specializzato nella produzione industriale (tecnologie innovative applicate ai processi di produzione) e nei prodotti di design industriale. PRODINTEC è responsabile per il sistema di controllo e il modulo di acquisizione per le ortotimmagini.</p>
	<p>Università di Padova</p> <p>Il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione è un importante centro per l'educazione, la ricerca e lo sviluppo tecnologico nel campo dell'elettronica, della fisica quantistica, del controllo automatico, della fotonica, delle telecomunicazioni, dell'informatica, della ricerca operativa e della bioingegneria. UNIPD si focalizzerà principalmente sulla 2.5D completeness inspection. UNIPD fornirà le proprie conoscenze nella computer vision e nella robotica per lo sviluppo delle componenti hardware e software del primo prototipo del sistema di ispezione, composto da laser e videocamera.</p>

2.6 Test Case

I partner impegnati nel progetto 3DComplete si sono occupati inizialmente di cercare aziende interessate agli sviluppi del sistema e al loro impiego all'interno della loro linea di produzione.

Da questa ricerca sono emerse diverse richieste. In Italia molte aziende hanno mostrato interesse nel campo del controllo di schede elettroniche (PCB) assemblate: in particolare, è emersa la necessità di verificare la presenza di tutti i componenti sulla scheda, il corretto assemblaggio e orientazione (vedi Appendice A). Richieste

simili sono pervenute anche da altre aziende contattate dai partner europei (vedi Appendice C). Sono poi interessate aziende nel settore dell'automobile, prima tra tutte BMW (vedi Appendice B).

Capitolo 3

Il sistema di visione: Hardware

3.1 Descrizione del sistema

Il sistema automatico di ispezione ottica che si vuole implementare dovrà essere conforme alle richieste stabilite nel progetto 3DComplete e dovrà permettere il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Mantenendo un occhio sempre puntato sull'aspetto economico, il sistema dovrà comunque essere in grado di fornire un'immagine 2D dell'oggetto ispezionato e la relativa shape 3D con una elevata velocità di acquisizione ed elaborazione. Solo coniugando questi aspetti, infatti, sarà possibile ottenere un prodotto competitivo nel mercato, alla portata anche di piccole e medie imprese che non possono allo stato attuale permettersi sistemi di visione di tale livello tecnologico.

Prima di analizzare l'architettura del sistema, torna utile riassumere brevemente le caratteristiche richieste:

- acquisizione di immagini 2D a colori, con risoluzione sufficiente a svolgere tutti i test di completeness inspection forniti anche dagli attuali sistemi di visione 2D;
- acquisizione shape 3D come nuvola di punti o immagine di range (immagine 2.5D) ottenute dalla combinazione di singoli profili, con buona risoluzione in profondità e ad elevata velocità;
- associazione di ogni punto della shape 3D con il relativo valore di colore.

Le caratteristiche sono tali da richiedere un sistema col quale sia il più possibile immediato e veloce associare dati 3D con immagini bidimensionali a colori. A tal scopo si è scelto di implementare un laser scanner per l'acquisizione di profili dotando il sistema di una videocamera a colori e di uno o più laser. Per laser, si intende qui un emettitore di luce laser che proietta una linea di luce colorata il più possibile collimata e di intensità uniforme. Con questa strumentazione è così possibile eseguire la triangolazione a partire dalle immagini acquisite per ricavare le profondità in ogni punto dell'oggetto ispezionato. Verrà analizzato, dunque, il comportamento della linea laser quando questa è proiettata direttamente sull'oggetto.

Mentre da un lato l'impiego di un laser profile scanner consente al sistema di raggiungere velocità di acquisizione sufficientemente elevate, dall'altro richiede una fase preventiva di calibrazione del sistema stesso. Per facilitarne l'impiego al cliente finale, si può pensare di progettare un sistema statico in cui la configurazione e le posizioni relative di videocamera e laser e anche dell'obiettivo della videocamera stessa, siano stabilite una volta per tutte e fisse per tutta la durata di vita del sistema. In questo modo, infatti, la calibrazione può essere fatta in fase di produzione per fornire al cliente un prodotto già calibrato. Sorge però un problema: avere un sistema statico, significa anche che questo è studiato, realizzato, per operare in un determinato campo di vista. Inoltre, più si vuole che la precisione sia alta e più il campo di vista deve essere ridotto.

Come da richieste di 3DComplete, invece, si vuole ottenere un campo di vista variabile, con un range che va da un volume di pochi centimetri cubici fino ad un metro cubo. Da qui, allora, sorge la necessità di rendere il sistema flessibile e adattabile alle diverse situazioni in cui esso può trovare impiego. Per fare questo è necessario lasciare all'utente finale la possibilità di regolare la disposizione di videocamera e laser (distanza tra i due dispositivi e inclinazione tra i rispettivi assi). Di conseguenza ricadrà a carico dell'utente anche l'esecuzione della procedura di calibrazione, necessaria ogni qualvolta la configurazione del sistema subisca variazioni. Occorre dunque studiare una procedura di calibrazione semplice e veloce, che possa essere eseguita anche da persone le cui conoscenze tecniche siano limitate. Allo stesso tempo dovrà essere una procedura robusta, che non richieda necessariamente particolari attenzioni o condizioni di attuazione ottimali.

La tecnologia selezionata per la costruzione della shape 3D comporta la necessità di acquisire tutti i singoli profili dell'oggetto. L'acquisizione non sarà limitata ad una sola immagine, ma sarà costituita da una serie di frame. Da ogni frame è possibile estrarre un singolo profilo dell'oggetto ispezionato, ovvero i soli punti in cui il laser è proiettato al momento dell'acquisizione dell'immagine dalla videocamera. Il sistema dovrà quindi avanzare rispetto all'oggetto per acquisire un determinato numero di profili. Sarà poi sufficiente unire i dati di ogni profilo 3D per ottenere la shape 3D che descrive l'intero oggetto ispezionato.

Finora non si è ancora considerato un aspetto importante, cioè dove risieda l'unità di calcolo principale, il cuore del sistema di visione. Nel caso si scelga di utilizzare una *smart camera* come tecnologia per l'acquisizione delle immagini 2D, buona parte dell'elaborazione può essere delegata a tale dispositivo. Questo però influisce negativamente sulla flessibilità del sistema, in quanto non è possibile chiedere all'utente di programmare la smart camera in base all'impiego che intende fare del sistema di visione. Inoltre il controllo di qualità può richiedere la configurazione delle parti da ispezionare su ogni oggetto, specificando metodi che sfruttano anche le informazioni 3D. Di conseguenza, si richiede che la procedura di elaborazione sia facilmente configurabile da parte dell'utente. Per questo motivo il pacchetto di controllo qualità deve essere implementato su personal computer per fornire all'utilizzatore un'interfaccia grafica semplice e completa. Si è scelto così di sviluppare l'intero applicativo su PC, compresa la sezione di elaborazione di immagini utile alla creazione del modello.

Riassumendo, il sistema automatico di ispezione ottica sarà composto dal seguente hardware:

- videocamera 2D industriale;
- uno o più moduli laser con ottica per la proiezione di una linea uniforme;
- personal computer;
- mezzo di movimentazione del sistema o in alternativa dell'oggetto ispezionato (nel prototipo è stato impiegato un braccio meccanico prodotto da Mitsubishi Electric per movimentare il sistema di acquisizione).

Nel seguito del capitolo verranno illustrati i componenti hardware scelti, evidenziandone ove possibile le caratteristiche tecniche, i pregi e i difetti. Viene spiegata in primo luogo la scelta della videocamera, per poi passare al laser e al sistema di movimentazione impiegato in fase di test. Solo successivamente viene presentata la configurazione dei suddetti componenti impiegata nel prototipo del sistema di acquisizione realizzato in laboratorio.

3.2 Texture 2D: la videocamera

Il progetto 3DComplete prevede la realizzazione di un sistema automatico di ispezione ottica che possa sopperire alle mancanze degli attuali sistemi 2D. Le informazioni tridimensionali dovranno essere considerate accessorie, ovvero non dovranno comportare in alcun modo perdita di qualità nelle immagini di output bidimensionali. La risoluzione richiesta alla videocamera dovrà quindi essere almeno pari a quella dei sistemi attuali. Una indicazione ci è fornita anche dalle richieste del progetto 3DComplete, dove viene stabilito che la risoluzione laterale dovrà essere di almeno 1500 pixel. Nella scelta non si deve trascurare l'attitudine del sistema ad adattarsi alle diverse condizioni di acquisizione (ad esempio variazioni di luce) e ai diversi oggetti che si possono presentare (che differiscono per forma e dimensioni).

Nel campo della visione industriale e dei sistemi dedicati all'automated optical inspection, trovano vasto impiego le *smart camera* (videocamere intelligenti). Si tratta di un sistema di acquisizione e trattamento di immagini in cui le componenti di digitalizzazione ed il processore che effettua l'elaborazione (spesso con l'aggiunta di componenti per l'interfacciamento e la comunicazione con dispositivi esterni) risiedono all'interno di un unico contenitore. Le smart camera non rappresentano certo l'unica soluzione, ma sono frequentemente favorite. Le differenze rispetto alle videocamere industriali meritano quindi un approfondimento.

Da prendere in considerazione, è anche la scelta tra sensore CCD (Charge Coupled Device) e CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor), che si differenziano per la tecnologia adottata per convertire la luce in segnali elettrici. Nel sensore CCD la luce viene convertita in una carica elettrica. Le cariche dei singoli pixel vengono trasferite attraverso gli elementi adiacenti fino ad un unico convertitore da cui vengono lette. Nei CMOS la lettura della carica avviene localmente con

un dispositivo dedicato per ogni pixel, producendo così un segnale meno uniforme. Tale non-uniformità si nota particolarmente in contesti poco illuminati e anche in applicazioni ad alta velocità. I sensori CMOS possono essere impiegati in applicazioni che richiedono basso consumo energetico e dimensioni ridotte, mentre i sensori CCD, più costosi rispetto ai primi, sono raccomandati nelle applicazioni che richiedono elevata qualità delle immagini. Per l'uso di cui se ne vuole fare nel sistema di visione per 3DComplete la scelta dovrà quindi ricadere su un sensore CCD.

3.2.1 Confronto tra sistema con videocamera basato su PC e smart camera

Smart camera e sistemi di visione basati su PC (che includono videocamera, frame grabber, PC e librerie di computer vision) presentano entrambi punti di forza e carenze. Evidenziamo qui di seguito le principali differenze tra i due sistemi.

Potenza di calcolo

Le smart camera, sebbene negli anni stiano vivendo notevoli progressi, presentano potenze di calcolo limitate rispetto ad un sistema di visione industriale che può beneficiare di un personal computer. Ciò è conseguenza delle limitate dimensioni delle smart camera.

Completezza

I sistemi di visione industriale sono composti da diverse componenti: illuminatori, ottiche, sensore di acquisizione, unità di calcolo per elaborazione e analisi delle immagini e interfacce esterne. Un vantaggio delle smart camera sta nell'integrare la maggior parte di queste componenti garantendone così la massima compatibilità. Ciò rappresenta un significativo risparmio di tempo, che sarebbe invece necessario per assicurare l'interoperabilità tra le diverse componenti in un sistema basato su PC.

Longevità

I componenti delle smart camera sono appositamente selezionati per creare un prodotto duraturo nel tempo. Dall'altra parte, invece, i personal computer commerciali hanno un ciclo di vita relativamente più breve. I PC di più alto livello industriale sono comunque facilmente espandibili per incrementare la potenza negli anni, ma si entra in una categoria di computer costosa.

Punti di ispezione multipli

Tipicamente, una smart camera consente un solo punto di ispezione, mentre una soluzione basata su PC può gestire punti di ispezione multipli. E' possibile comunque impiegare più smart camera indipendenti. Questa alternativa è certamente più dispendiosa, ma in caso di guasto di una smart camera cade un solo punto di ispezione, mentre nel caso di guasto del PC l'intero sistema entra in blocco.

Software

Solitamente con le smart camera viene fornito anche un ambiente di sviluppo dedicato che non richiede la conoscenza dei linguaggi di programmazione tradizionali. In genere le smart camera sono progettate per svolgere specifiche funzioni di ispezione, quali ad esempio misurazioni unidimensionali o rilevamento di codici a barre. Molte smart camera sono preconfigurate e utilizzabili solo per le funzioni per cui sono pensate. Esistono sì smart camera che permettono lo sviluppo di applicazioni che richiedono una logica complessa, ma anche in tal caso è conveniente delegare il compito ad un PC.

Scelta del sensore

Le videocamere industriali offrono maggiori possibilità di scelta per quanto riguarda il sensore ottico. Una tipica smart camera dispone di non più di 10 sensori, mentre le videocamere offrono centinaia di sensori differenti, inclusi sensori UV, infrarossi e altre opzioni specifiche.

Costruzione e Ambiente di utilizzo

Una tipica videocamera industriale è strutturalmente più piccola rispetto alle smart camera, ma richiede il posizionamento di un PC nelle vicinanze. Le smart camera è tipicamente progettata per essere inserita in ambienti industriali e può quindi operare anche in condizioni limite.

Conclusione

Analizzati pregi e difetti delle videocamere industriali in confronto alle smart camera e tenendo presenti le richieste del sistema che si intende sviluppare, la scelta della componente di visione 2D ricade necessariamente su una videocamera industriale. Un sistema basato su personal computer non limita il campo di applicabilità del prodotto finito. Inoltre le smart camera sono spesso pensate per applicazioni 2D, mentre il sistema dovrà essere in grado di fornire modelli tridimensionali. Questo comporta la necessità di disporre di una elevata potenza di calcolo.

Tutti gli algoritmi di elaborazione delle immagini verranno quindi implementati ed eseguiti su personal computer.

3.2.2 mvBlueCOUGAR-X

La scelta della videocamera industriale che sarà la componente 2D del sistema di acquisizione è caduta sulla serie mvBlueCOUGAR-X (Figura 3.1) prodotta da MATRIX VISION. I dispositivi di tale serie presentano un'interfaccia Gigabit Ethernet e possono quindi essere collegati alla maggior parte dei PC senza l'aggiunta di altre componenti di interfaccia. Tutte le specifiche tecniche sono illustrate in Figura 3.2.



Figura 3.1: mvBlueCOUGAR-X.

Features	
Common Hardware Features	
<ul style="list-style-type: none"> • Gigabit Ethernet interface (1000 Mbit/s with 100 Mbit/s compatibility) 	<ul style="list-style-type: none"> • storable user configurations (5 config.) and user parameters (512 bytes on EEPROM)
<ul style="list-style-type: none"> • distances up to bis 100 meters without switch 	<ul style="list-style-type: none"> • real-time flat field correction (FFC), full AOI
<ul style="list-style-type: none"> • 64 MB image memory 	<ul style="list-style-type: none"> • timestamp (latch/reset, μs precise, 64 bit)
<ul style="list-style-type: none"> • connectors: <ul style="list-style-type: none"> - RJ-45 Gigabit Ethernet with screw-locking - Industry standard Hirose type 12-pin locking connector 	<ul style="list-style-type: none"> • single frame / multi frame
<ul style="list-style-type: none"> • support for motorized lenses 	<ul style="list-style-type: none"> • electronic mirror functionality: CMOS: hor./vert.
<ul style="list-style-type: none"> • smart I/O: <ul style="list-style-type: none"> - 2 inputs 3..24V \pm 1V (opto-isolated with current limiters) - 4 outputs up to 24V and 700 mA (1.5A total) direct drive output for high power flash or relays or actuators (high-side) 	<ul style="list-style-type: none"> • enhanced I/O functionality (4 counters, 2 timers) for <ul style="list-style-type: none"> - Pulse Width Modulation - direct fan control - direct flash control
<ul style="list-style-type: none"> • industrial power supply range 12..24 VDC 	<ul style="list-style-type: none"> • power consumption < 4W
<ul style="list-style-type: none"> • adjustable C-mount, CS-mount, S-mount (optional) 	<ul style="list-style-type: none"> • weight without lens: approx. 110 g
<ul style="list-style-type: none"> • ADC resolution: CCD: 14 bit (14/12/8 bit transfer); CMOS ADC on chip 	<ul style="list-style-type: none"> • internal temperature sensor (readable) with programmable alarm threshold
<ul style="list-style-type: none"> • freely editable hardware Look Up Table (LUT) 12 bit \rightarrow 10 bit 	<ul style="list-style-type: none"> • permissible ambient temperature: <ul style="list-style-type: none"> - operation 0 to 45 $^{\circ}$C / 30 to 80 %RH - storage -20 to 60 $^{\circ}$C / 20 to 90 %RH
<ul style="list-style-type: none"> • trigger overlap 	<ul style="list-style-type: none"> • size without lens (w x h x l): 39.8 x 39.8 x 35 mm
<ul style="list-style-type: none"> • as an option: IP65/67, enhanced temperature range 5 .. 55$^{\circ}$C 	

Figura 3.2: Caratteristiche tecniche mvBlueCOUGAR-X.

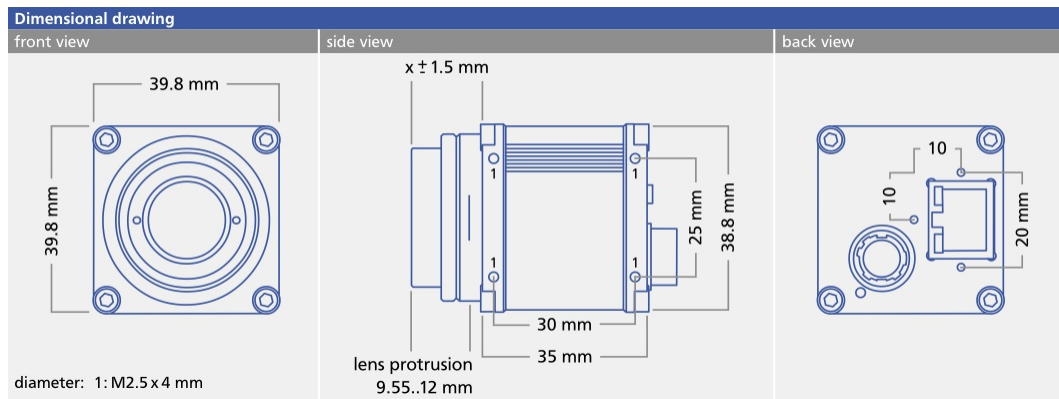


Figura 3.3: Dimensioni mvBlueCOUGAR-X.

Questa serie di telecamere sono pienamente conformi all'ultima revisione degli standard *GigE Vision*^{®1} e *GenICam*^{TM2} e adottano componenti interni di più recente costruzione come FPGA, sensori di elevate prestazioni e altre componenti di supporto. Il tutto è racchiuso in uno dei case più piccoli in commercio (vedi Figura 3.3).

Il modello scelto è la mvBlueCOUGAR-X124C. Il prezzo è di circa 1600€. In Figura 3.4 sono illustrate le specifiche del suo sensore, che ha una risoluzione di 1600x1200 pixel e permette di ottenere una risoluzione finale maggiore di 1500 pixel lateralmente (come da richieste per 3DComplete). Più precisamente, la risoluzione in output del sistema completo, sarà limitata solo in una direzione a 1600 pixel. Per ottenere questo risultato, la videocamera deve essere spostata lungo il suo asse verticale: è possibile dunque acquisire singole immagini (1600x1200 pixel) in diversi punti e comporle per ottenere una risoluzione maggiore nella direzione di avanzamento. La risoluzione grafica in altezza non sarà più 1200, ma limitata esclusivamente dalle possibilità di spostamento della videocamera.

3.2.2.1 mvIMPACT

La MATRIX VISION distribuisce inoltre *mvIMPACT*, una libreria completa che fornisce algoritmi ad alte prestazioni per la computer vision. La libreria è sviluppata con un'architettura ad oggetti per essere facilmente integrata e aggiornata per scopi futuri. Supporta inoltre i linguaggi C, C++, C# e VisualBasic.NET della Microsoft.

mvIMPACT integra un gran numero di funzioni per l'acquisizione, l'elaborazione e l'estrazione di informazioni dalle immagini. Supporta perfettamente tutti i dispositivi della casa produttrice, facilitandone il loro utilizzo e la loro integrazione nelle applicazioni.

¹GigE Vision[®] è un protocollo di rete progettato per la comunicazione tra un dispositivo video e un'applicazione. In particolare definisce le procedure per il rilevamento dei dispositivi video, per la trasmissione dati e la lettura/scrittura dei parametri della videocamera.

²GenICam sta per *GEN-eric programming I-nterface for CAM-eras*. Si tratta di una interfaccia unificata per accedere e modificare i parametri del dispositivo, mediante l'uso di file descrittivi in formato XML.

Model name	mvBlueCOUGAR -Xx24
Model variant	G (gray), C (color)
Resolution of sensor's active Area (width x height in [pixels])	1600 x 1200
Sensor type	CCD
Maximum frame rate [Hz]	28
Transfer type	full frame interline transfer
Sensor size	1/1.8"
Readout type	
Pixel size (width x height in [μm])	4.4 x 4.4
Integration time	20 μs - 10 s
ADC resolution	14 bit
Overlap capabilities	Yes
Sensor manufacturer	Sony
Sensor name	ICX274AL/AQ

Figura 3.4: Specifiche sensore mvBlueCOUGAR-X

La libreria è suddivisa in 3 moduli: il primo è un pacchetto base comprendente tutte le funzioni utili all'interfacciamento con la videocamera e l'acquisizione di immagini, mentre gli altri forniscono funzioni dedicate all'elaborazione di immagini e applicazioni di ispezione ottica (vedi Figura 3.5).

Il pacchetto base, *mvIMPACT Base*, comprende più di 120 funzioni e viene fornito gratuitamente con l'acquisto della videocamera (vedi Figura 3.6)

3.2.3 Ottica

Videocamere industriali, come la mvBlueCOUGAR-X, al momento dell'acquisto sono prive dell'ottica. Le ottiche disponibili sono molteplici e nella scelta si deve prestare attenzione all'uso che si intende fare della videocamera.

Una prima distinzione va fatta tra ottiche fisse e ottiche zoomabili controllate remotamente. Le prime presentano qualche limitazione, ma sono poco costose e hanno minore ingombro. Le ottiche zoomabili remotamente richiedono invece encoder di posizione e devono essere meccanicamente stabili. Sono estremamente flessibili, ma costose. Potrebbero essere indispensabili per alcune applicazioni di ispezione.

Altro parametro di distinzione consiste nella tipologia di lente impiegata. In Figura 3.7 sono illustrati i principi di funzionamento per i diversi tipi di obiettivo.

Nel settore della visione artificiale, la qualità delle ottiche si traduce in prestazioni superiori del sistema. Quando vi è il bisogno di misurare parti meccaniche in maniera molto precisa, con alto contrasto e con la minor distorsione geometrica possibile, si ricorre usualmente agli obiettivi telecentrici. L'uso di questa tipologia di ottiche può minimizzare o addirittura eliminare gli effetti prospettici che causano un

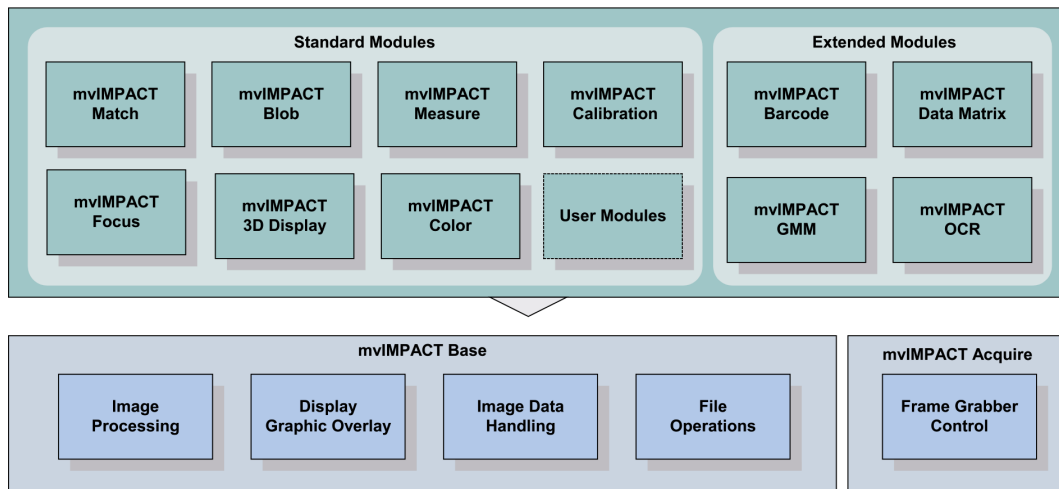


Figura 3.5: Moduli della libreria mvIMPACT.

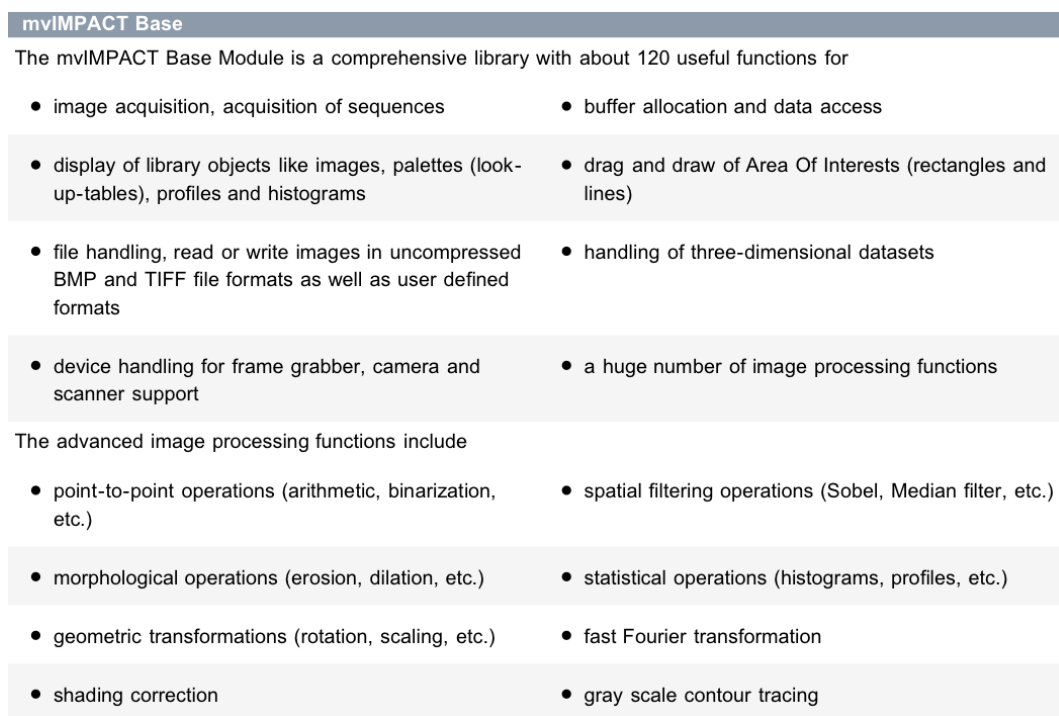


Figura 3.6: Funzioni della libreria mvIMPACT Base.

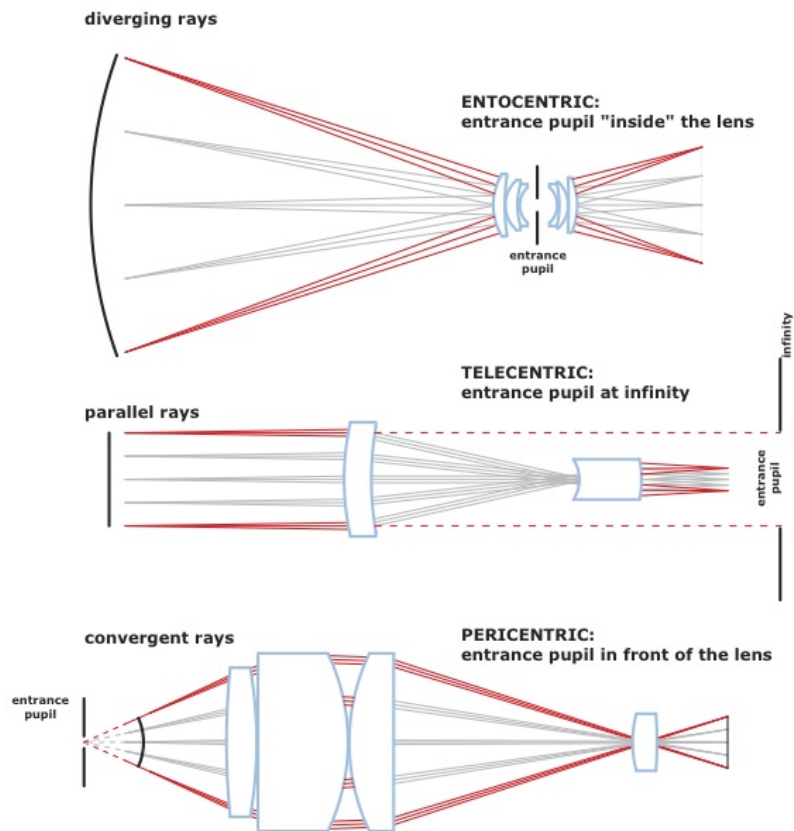


Figura 3.7: Principi di funzionamento di diversi tipi di obiettivo.

cambio di ingrandimento quando il pezzo non è ben posizionato o quando è “molto tridimensionale”.

Oltre ai problemi di elaborazione dell’immagine, in un sistema di visione si deve tenere presente che le ottiche comuni, ovvero le entocentriche, permettono che alcuni fattori limitino l’accuratezza e la ripetibilità della misura cui l’applicazione è preposta. Questi sono:

- Cambio di ingrandimento dovuto a spostamenti dell’oggetto
- Distorsione dell’immagine
- Errori prospettici
- Bassa risoluzione dell’immagine
- Incertezza sulle posizioni dei bordi, dovuta alla tipologia di illuminazione

Gli obiettivi telecentrici riducono o addirittura cancellano molti di questi problemi, pertanto sono diventati un “must” per coloro che sviluppano applicazioni che richiedono misure di precisione. Per contro, gli obiettivi telecentrici sono molto costosi e hanno un notevole volume, e non possono quindi essere inseriti in tutti i contesti industriali, ma solo nei casi in cui la precisione richiesta sia massima, a fronte di una maggior spesa.

Con l’impiego di ottiche tradizionali entocentriche, occorre tenere maggiormente in considerazione i limiti suddetti e provvedere alla loro rimozione, per quanto possibile, mediante algoritmi software.

3.2.3.1 Ottica 1:2.0/15mm

Per le prime acquisizioni è stata utilizzata un’ottica 1:2.0/15mm a disposizione del laboratorio. Con tale lunghezza focale, l’immagine, ad una distanza di circa 40-50cm dal soggetto, riproduce fedelmente le dimensioni, introducendo una minima distorsione dovuta alla prospettiva, riscontrata soprattutto in prossimità dei bordi superiore e inferiore o negli angoli dell’immagine.

3.2.3.2 Ottica 1:1.4/16mm

Dati i buoni risultati ottenuti con l’ottica già in dotazione al laboratorio, l’ottica dedicata al sistema è stata acquistata con parametri del tutto simili. Presenta una lunghezza focale di 16mm. La distorsione è minore rispetto all’ottica precedente, al punto da non essere visivamente apprezzabile.

3.3 Shape 3D: *triangulation laser profile scanner*

Un’analisi attenta dei sistemi presenti sul mercato e delle tecnologie finora sviluppate, ha portato a considerare il metodo della triangolazione laser come il più adatto al sistema di ispezione che si intende realizzare. La tecnica della triangolazione laser

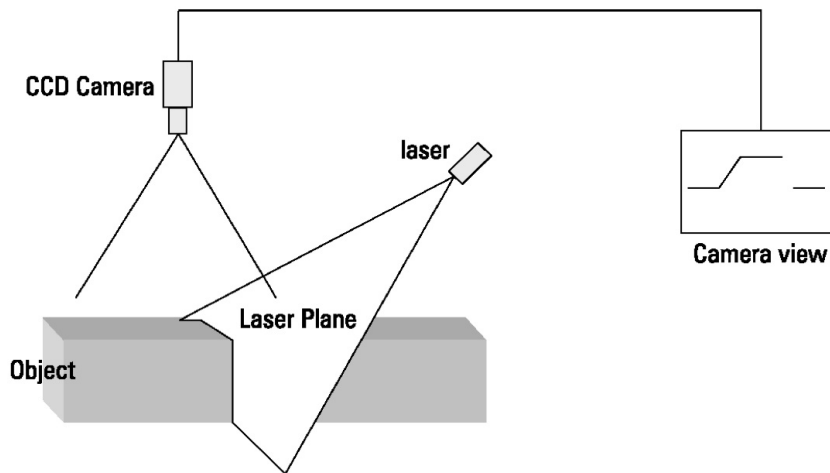


Figura 3.8: Principio della triangolazione.

consiste nel proiettare sulla superficie dell'oggetto da misurare una luce laser puntuale, a lama o strutturata (vedi Figura 3.8); in base a semplici relazioni trigonometriche, inquadrando la parte illuminata dell'oggetto con un'opportuna angolazione, si ricavano con estrema precisione le misure di un profilo dell'oggetto. In questo modo è possibile sfruttare la stessa videocamera mvBlueCOUGAR-X usata per l'acquisizione dell'immagine 2D anche per il calcolo delle informazioni 3D. Per quanto riguarda le componenti hardware del sistema di acquisizione è quindi sufficiente aggiungere solo uno o più emettitori di luce laser.

3.3.1 Z-Laser ZM18S

Il laser selezionato è prodotto da Z-Laser e ha le seguenti caratteristiche:

- Colore luce laser: rosso
- Lunghezza d'onda: 635nm
- Potenza: 5mW
- Angolo di proiezione: 30°
- Ottica: linea rettilinea
- Intensità luce: uniforme
- Prezzo: €580

3.3.2 Limiti della triangolazione con luce laser

La tecnica della triangolazione del laser permette una elevata velocità di elaborazione e non è invasiva perché non vi è contatto con l'oggetto ispezionato, ma per contro



Figura 3.9: Z-Laser ZM18S.

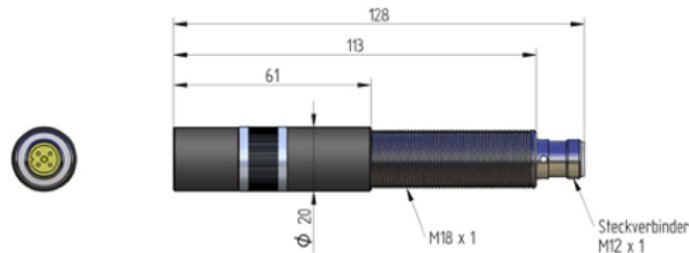


Figura 3.10: Dimensioni (in mm) del Z-Laser ZM18S.

presenta alcuni svantaggi derivanti dalla posizione del laser rispetto alla videocamera e dalla difficoltà di identificare con precisione la luce laser su particolari superfici. Di seguito si riporta una lista degli svantaggi:

- Superfici riflettenti, che riflettono la luce del laser, possono introdurre errori nella stima delle misure di profondità;
- Superfici scure, nere, che non riflettono la luce, ma tendono ad assorbirla rendono difficilmente rilevabile la sagoma della linea laser;
- Superfici particolarmente colorate rendono difficile analizzare le caratteristiche della luce proiettata, che tende a confondersi;
- La geometria dell'oggetto può causare l'introduzione di zone di ombra nel modello;
- Gli algoritmi di identificazione del laser funzionano bene in assenza di luce ambiente, o comunque fintanto che la luce laser è la fonte di luce prevalente.

3.3.3 Configurazione laser-videocamera

Un sistema basato sulla triangolazione del laser, con dispositivo video separato dal modulo laser, permette molteplici configurazioni ognuna delle quali presenta punti di debolezza e di forza.

Con riferimento alla Figura 3.11, si propongono di seguito due geometrie:

- **Ordinary (geometria ordinaria):** La videocamera è posta ortogonalmente al piano (perpendicolare alla direzione di movimento) e il laser illumina l'oggetto da un lato. Con questa geometria si ottiene la massima risoluzione nella misura del profilo.

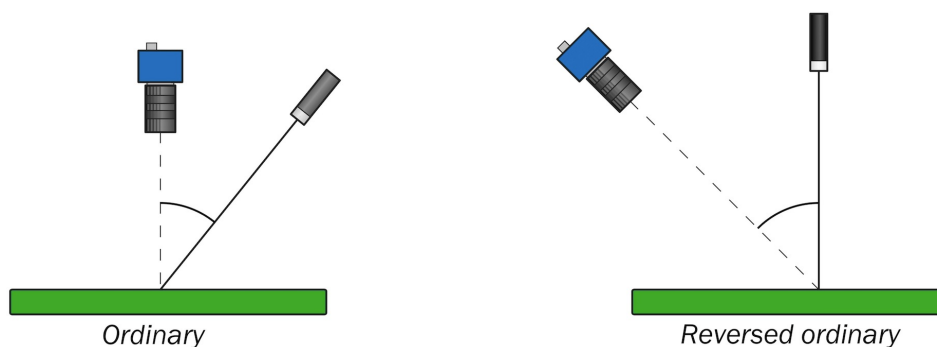


Figura 3.11: Disposizione videocamera-laser.

- **Reverse ordinary (geometria inversa):** Come per il setup ordinario, ma laser e videocamera sono scambiati, così il laser risulta ortogonale al piano.

Analizziamo ora tre diverse configurazioni di laser e videocamera che possono essere adottate nel sistema di acquisizione.

Una videocamera e un laser

Questa è la configurazione di base. La videocamera deve essere posta in modo che il suo asse sia ortogonale al piano su cui poggia l'oggetto da ispezionare. In questo modo la ricostruzione della texture è più immediata e completa, non presenta quindi zone d'ombra o oggetti distorti. L'asse del laser, affinché si possa attuare la triangolazione, deve essere incidente con l'asse della videocamera. L'inclinazione del laser e la sua distanza dalla videocamera possono essere modificate per l'ispezione di oggetti di diverse dimensioni o per aumentare la precisione delle misure di profondità. L'importante è che la proiezione del laser sull'oggetto rientri nel campo visivo della videocamera.

L'inclinazione del laser comporta, in base alla geometria dell'oggetto, il formarsi di alcune zone di ombra. Questo rappresenta il limite principale di tale configurazione.

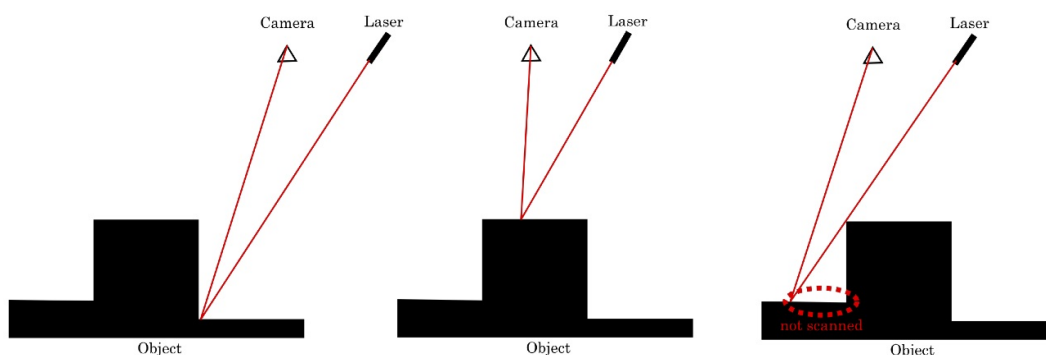


Figura 3.12: Triangolazione con 1 videocamera e 1 laser.

Una videocamera e due laser

Introducendo un secondo laser alla configurazione di base e posizionandolo dal lato opposto al primo rispetto alla videocamera, la scansione non è più affetta dal problema delle zone d'ombra. I due laser però potrebbero essere confusi tra loro in fase di estrazione dall'immagine. Questo è un problema facilmente risolvibile impiegando laser di colori diversi (e nella detection si dovrà sfruttare l'informazione di colore per distinguere l'uno dall'altro) oppure limitando il campo d'azione di ogni laser in una zona diversa dell'immagine (questo richiede maggiore attenzione nella fase di installazione del sistema).

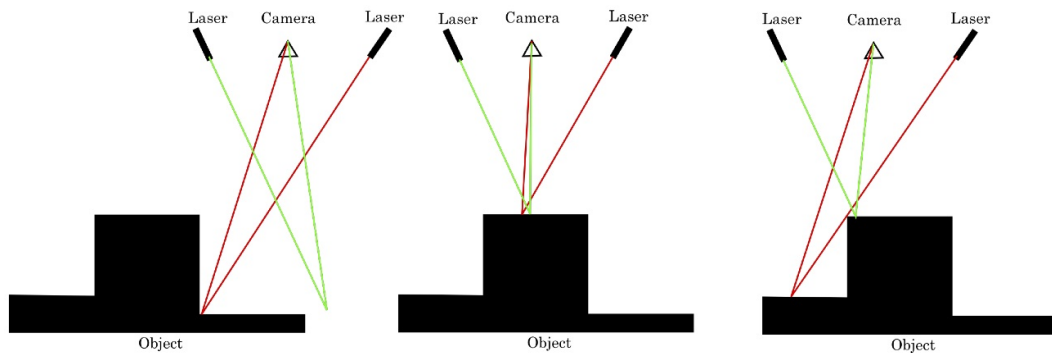


Figura 3.13: Triangolazione con 1 videocamera e 2 laser.

Due videocamere e un laser

In alternativa alla configurazione con 2 laser, si può pensare di scambiare i ruoli di laser e videocamera per escludere la possibilità di confondere i due laser nella fase di detection. L'unico laser dovrà allora necessariamente proiettare la luce in direzione perpendicolare all'oggetto così da poter raggiungere tutti i punti dell'oggetto. A seconda della geometria dell'oggetto, poi, la luce laser può essere riflessa in entrambe le videocamere o al limite in una sola.

Questa configurazione permette anche di ottenere due punti di vista differenti dell'oggetto, e consente dunque una più completa rilevazione della texture. Per contro è richiesta maggiore elaborazione e il sistema risulta più costoso rispetto all'equivalente composto da 1 videocamera e 2 laser.

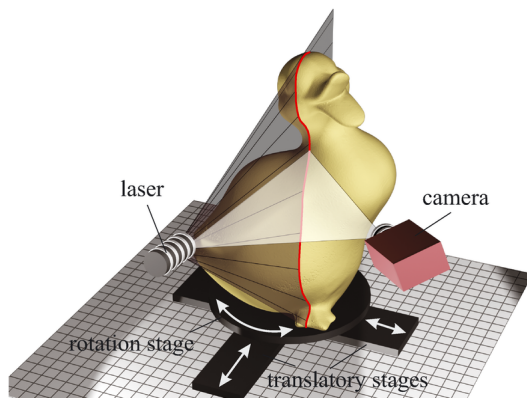


Figura 3.15: Sistema di movimentazione dell'oggetto ispezionato.

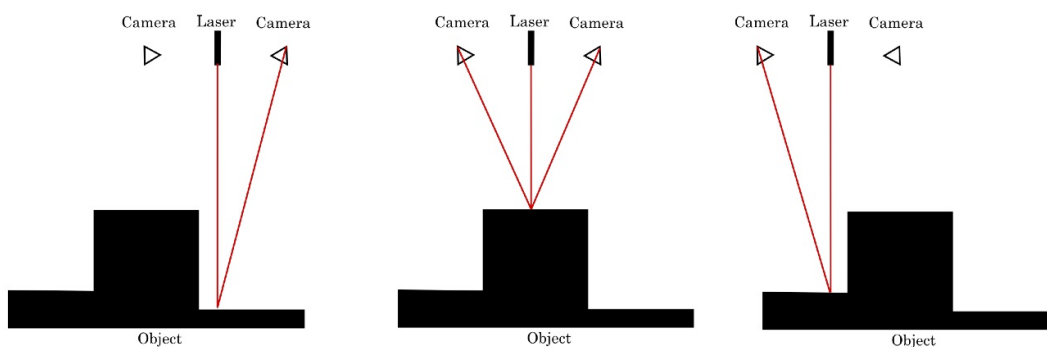


Figura 3.14: Triangolazione con 2 videocamera e 1 laser.

3.4 La movimentazione

Il laser scanner scelto per l'acquisizione delle informazioni 3D fornisce in output i punti triangolati di un singolo profilo. E' necessario allora che il sistema di acquisizione possa muoversi per acquisire tutti i profili dell'oggetto. In alternativa, si può pensare di mantenere fisso il sistema di acquisizione e far muovere l'oggetto ispezionato. Il sistema di movimentazione può essere più o meno complesso a seconda delle esigenze. Se più complesso, ad esempio un braccio meccanico come quello riportato in Figura 3.15, può costare anche 15-20 volte di più rispetto al resto dei componenti hardware che costituiscono il sistema di acquisizione. Questo incremento di prezzo non è accettabile per il sistema voluto in 3DComplete. Si deve allora limitare il movimento in una unica direzione con moto rettilineo uniforme. In tal caso vi sono soluzioni più economiche e in molti casi applicativi, in particolare nelle catene di montaggio industriale, si può sfruttare il movimento degli oggetti sui tappeti trasportatori degli impianti di produzione. Chiaramente ciò si può fare se si conosce la velocità esatta di avanzamento del tappeto trasportatore e tale velocità è, almeno a tratti, uniforme.

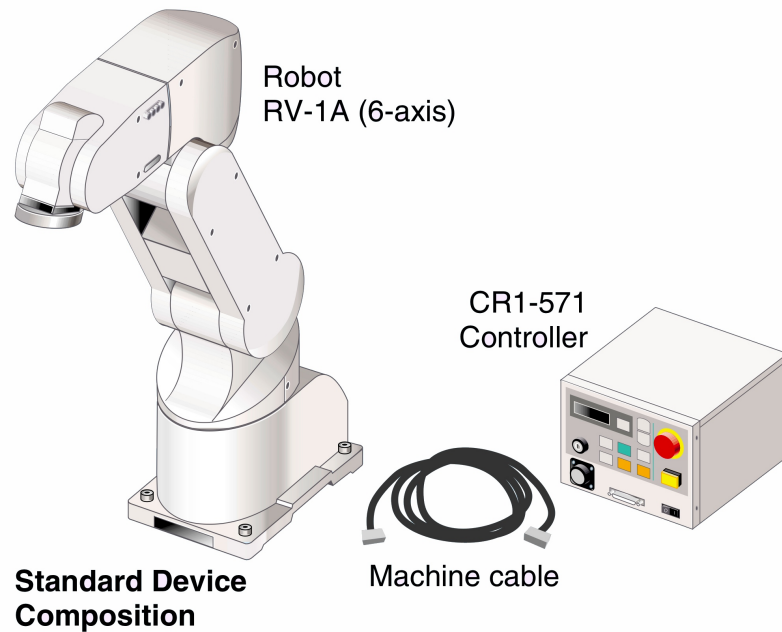


Figura 3.16: Mitsubishi Melfa.

Il movimento deve essere noto al fine di costruire una nuvola di punti coerente, conglobando i punti di tutti i singoli profili. I movimenti possono essere stimati posizionando alcuni marcatori nell'ambiente di acquisizione, oppure programmati e pertanto conosciuti a priori.

3.4.1 Mitsubishi Melfa RV-2A

Per la realizzazione del prototipo del sistema di ispezione avremo a disposizione un robot Melfa RV-2A della Mitsubishi. Ovviamente è impensabile l'impiego di tale robot manipolare in una generica PMI, ma noi lo useremo solo per produrre un movimento rettilineo uniforme, ottenibile poi con tecnologia a basso costo. Il setup per il prototipo prevede che il sistema di acquisizione (videocamera e laser) sia vincolato al braccio meccanico in movimento mentre l'oggetto rimane posato su un piano in posizione fissa.

3.5 Illuminatori

Nella categoria degli illuminatori rientrano anche gli emettitori di luce laser di cui si è parlato in precedenza. Oltre a questi, però, occorre anche illuminare l'oggetto in modo idoneo per l'acquisizione di immagini per mezzo della videocamera. La metodologia Extended 2.5D è dedicata in particolare alla modellizzazione di oggetti che si estendono prevalentemente in larghezza e lunghezza, e meno in altezza. Un buon esempio sono le schede elettroniche assemblate. In questi casi è consigliato adottare una sorgente di illuminazione diffusa così da evitare il formarsi di zone d'ombra. Vi-

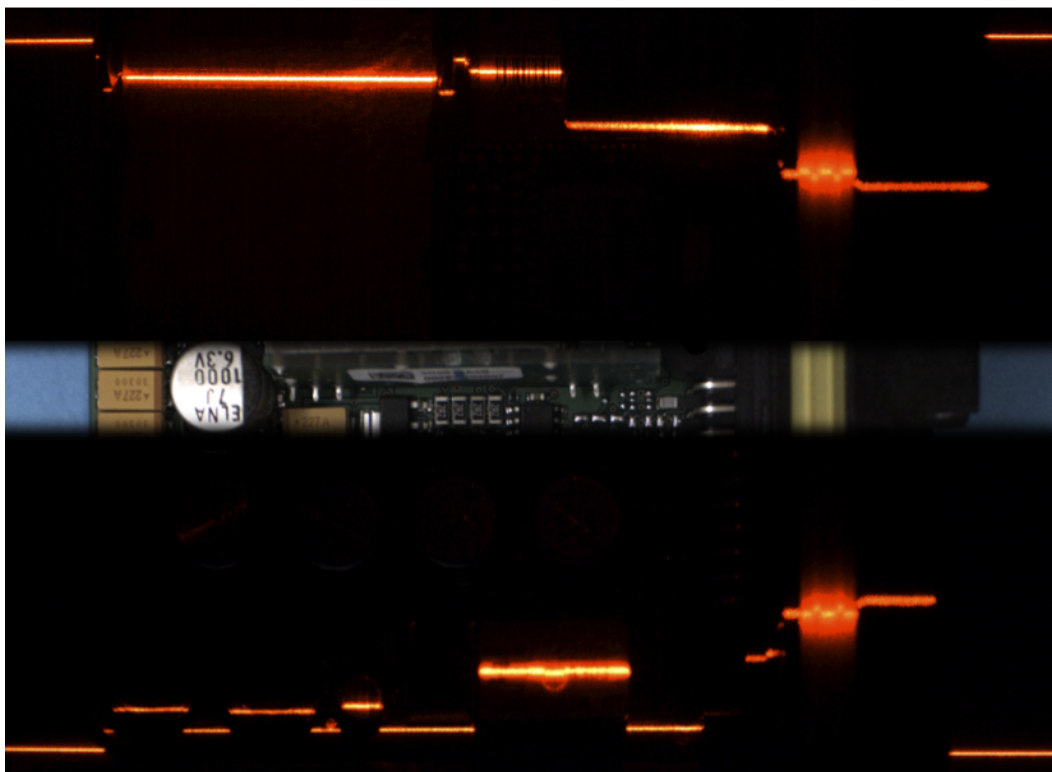


Figura 3.17: Esempio di frame acquisito dal sistema definitivo.

ceversa, come detto in precedenza, la linea laser viene bene identificata in condizioni di bassa illuminazione, o meglio in assenza di altre sorgenti di illuminazione.

Presentiamo nel seguito la configurazione scelta per il sistema nella sua versione finale e la configurazione utilizzata per eseguire le acquisizioni con il prototipo.

3.5.1 Configurazione ottimale

Per conciliare buone prestazioni degli algoritmi di detection della linea laser e buona qualità dell'immagine 2D si è scelto di impiegare un illuminatore a luce collimata per l'estrazione dei colori. Si tratta di una sorgente di luce che emette una linea di luce bianca, sufficientemente spessa per permettere la composizione dell'immagine 2D dell'oggetto mettendo insieme le fasce di linee illuminate di ogni frame successivo.

Come illustrato in Figura 3.17, la luce bianca sarà proiettata in centro all'immagine (nel punto di minima distorsione della videocamera), mentre i due laser dovranno essere posizionati in modo da operare ognuno in una delle due restanti aree dell'immagine. Il sistema così strutturato è pensato per operare in condizioni di buio, cosicché le zone dell'immagine in cui operano i laser sono scure (il laser diventa facilmente individuabile) e l'unica zona illuminata è dovuta alla luce bianca collimata.

Adottando questa configurazione, una sola scansione dell'oggetto permette l'estrazione della texture e dei profili 3D, entrambi in condizioni ottimali.

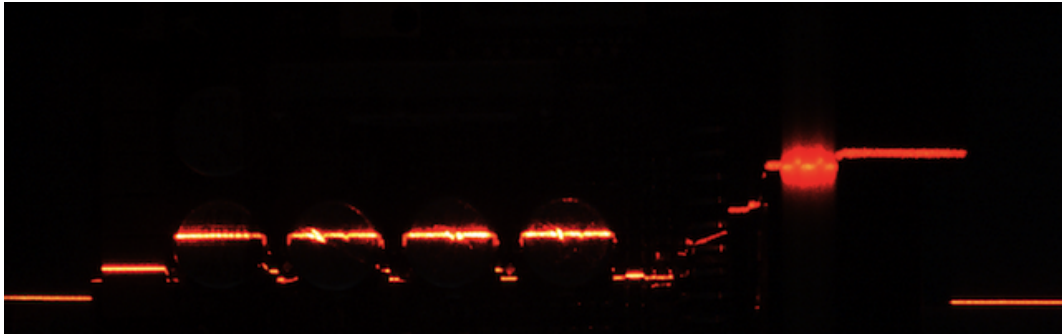


Figura 3.18: Esempio di frame per l'acquisizione della sola linea laser.

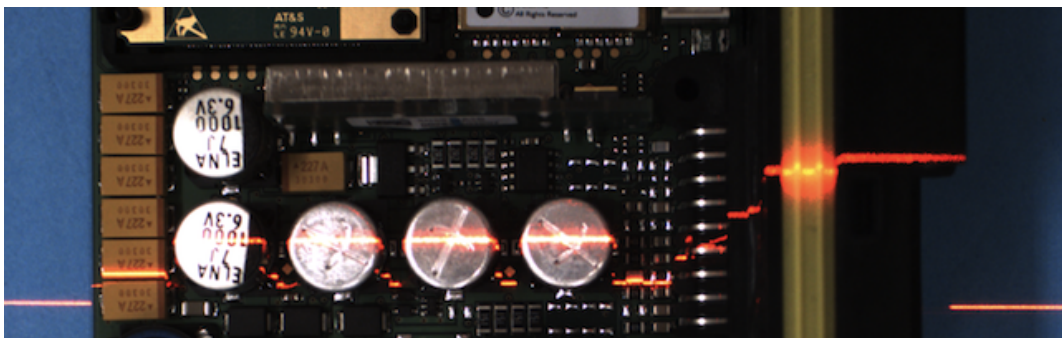


Figura 3.19: Esempio di frame per l'acquisizione della texture 2D.

3.5.2 Configurazione del prototipo

Per quanto riguarda la realizzazione del prototipo ci sono state delle limitazioni dovute a tempi di consegna del materiale. Non si è riusciti per tale motivo a disporre della sorgente di luce bianca collimata, quindi si è scelto di eseguire due passate per l'acquisizione dell'oggetto: la prima in condizioni di buio per identificare al meglio la linea laser mentre la seconda in presenza di luce ambientale diffusa per l'estrazione dei colori (viene presa la texture da linee in assenza di luce laser. Un esempio di frame per la detection del laser viene riportato in Figura 3.18, mentre per la texture in Figura 3.19. I frame sono riferiti all'acquisizione con un solo laser. In questo caso è stata ridotta la risoluzione in altezza della videocamera così da acquisire solo la parte di interesse, con conseguente aumento della velocità di acquisizione in fps della videocamera stessa.

Risoluzione

Per il prototipo, i dati utili al calcolo della risoluzione sono i seguenti:

Risoluzione immagine: 1600 x 800 pixel

Frame rate di acquisizione: 20,3 fps

Velocità di acquisizione: 10 mm/s

Area visibile: 140 x 70 mm

Spessore della linea laser: 1 pixel/frame (l'algoritmo di detection calcola la media sullo spessore della linea e la approssima ad 1 pixel).

La risoluzione lungo l'asse x della videocamera risulta quindi la seguente:

$$R_x = \frac{\text{area visibile asse } x \text{ [mm]}}{\#\text{pixel asse } x \text{ [pixel]}} = \frac{145}{1600} = 0,09 \text{ mm/pixel}$$

e la precisione:

$$P_y = 11,11 \text{ pixel/mm}$$

La risoluzione lungo l'asse y della telecamera, risulta invece:

$$F_y = \frac{\text{frame rate [fps]}}{\text{velocità acquisizione [mm/sec]}} = \frac{20,3}{10} = 2,03 \text{ frame/mm}$$

Quest'ultimo risultato non rappresenta un vincolo nella qualità della ricostruzione dei modelli: la precisione lungo l'asse y può migliorare aumentando il frame rate di acquisizione della videocamera, che in particolari situazioni può raggiungere i 400 fps. Anche la velocità di acquisizione dei profili è un parametro variabile: questo, però, è inversamente proporzionale alla risoluzione, occorre quindi aumentare progressivamente il frame rate per ottenere la precisione cercata.

La stima della risoluzione lungo l'asse z non è invece così immediata. Sperimentalmente si sono ottenuti valori prossimi al decimo di millimetro (col sistema posto a 30cm dall'oggetto e laser inclinati di 25° rispetto alla videocamera).

3.6 Conclusioni

L'architettura del sistema è stata sviluppata in funzione della flessibilità che vi vuole conferire al prodotto. Non viene infatti fornita un'indicazione precisa della distanza tra il centro della videocamera e quello del laser o ancora un'inclinazione prestabilita per il laser. Tali parametri possono essere impostati a seconda degli oggetti da ispezionare: da questo punto di vista, gli aspetti più rivelanti, e in contrasto tra loro, sono il range d'azione in profondità e la relativa precisione.

In Figura 3.20 è possibile vedere il sistema di visione assemblato in laboratorio e impiegato per le acquisizioni ed elaborazioni dei primi modelli.

Vengono peraltro fornite alcune indicazioni da rispettare, che dovranno essere riviste nel corso di ulteriori sviluppi futuri:

- Per una corretta acquisizione della texture, l'asse della videocamera deve essere ortogonale al piano su cui risiede l'oggetto ispezionato;
- I laser (se ne vengono utilizzati due) devono essere posti in modo che le linee proiettate nel campo di vista della videocamera occupino aree distinte;

- I laser (o il laser) devono essere installati in modo tale che il loro asse formi un angolo $> 20^\circ$ con l'asse della videocamera. In caso contrario le misure 3D non sono sufficientemente accurate;
- All'aumentare dell'inclinazione tra videocamera e laser aumenta la precisione delle misure di profondità a sfavore però del range d'azione nella terza dimensione, che si restringe proporzionalmente.

Nella sezione precedente è stata illustrata la configurazione ottimale in riferimento all'uso degli illuminatori. Purtroppo non sempre sarà possibile inserire il sistema in un ambiente buio (un'apposita camera oscura), perciò si forniscono altre indicazioni per poter usufruire dello stesso sistema di acquisizione anche in tali condizioni:

- Se non vi è necessità di acquisire anche l'immagine 2D (o comunque è sufficiente un'immagine di bassa qualità per colori e guadagno) è possibile dotare la videocamera di un apposito filtro passa banda. Quest'ultimo deve essere tarato sulla lunghezza d'onda dei laser impiegati cosicché, anche nelle condizioni di luce più sfavorevoli, nell'immagine acquisita dalla videocamera risulta evidente principalmente la linea di luce laser.
- Se invece vi è la necessità di acquisire anche l'immagine 2D è possibile configurare il sistema come al punto precedente e aggiungere una videocamera supplementare, senza filtro, cui assegnare il compito di acquisire esclusivamente le immagini 2D. In tal caso, l'immagine 2D e l'immagine di range dell'oggetto non sono sincronizzate. Se necessario per l'applicazione, è possibile sopperire a questo problema conoscendo i parametri estrinseci del sistema, o mediante un'apposita procedura di calibrazione (al momento non ancora prevista).

Il costo totale del sistema rientra nelle richieste di 3DComplete ed anzi, conteggiando PC, videocamera, ottica entocentrica e illuminatori risulta notevolmente inferiore. Resta margine per un eventuale sistema meccanico o elettrico per la movimentazione (se necessario a seconda degli ambiti in cui viene installato il sistema) e per eventuali costi dovuti alla parte software (si pensi a licenze per software di sviluppo e librerie).

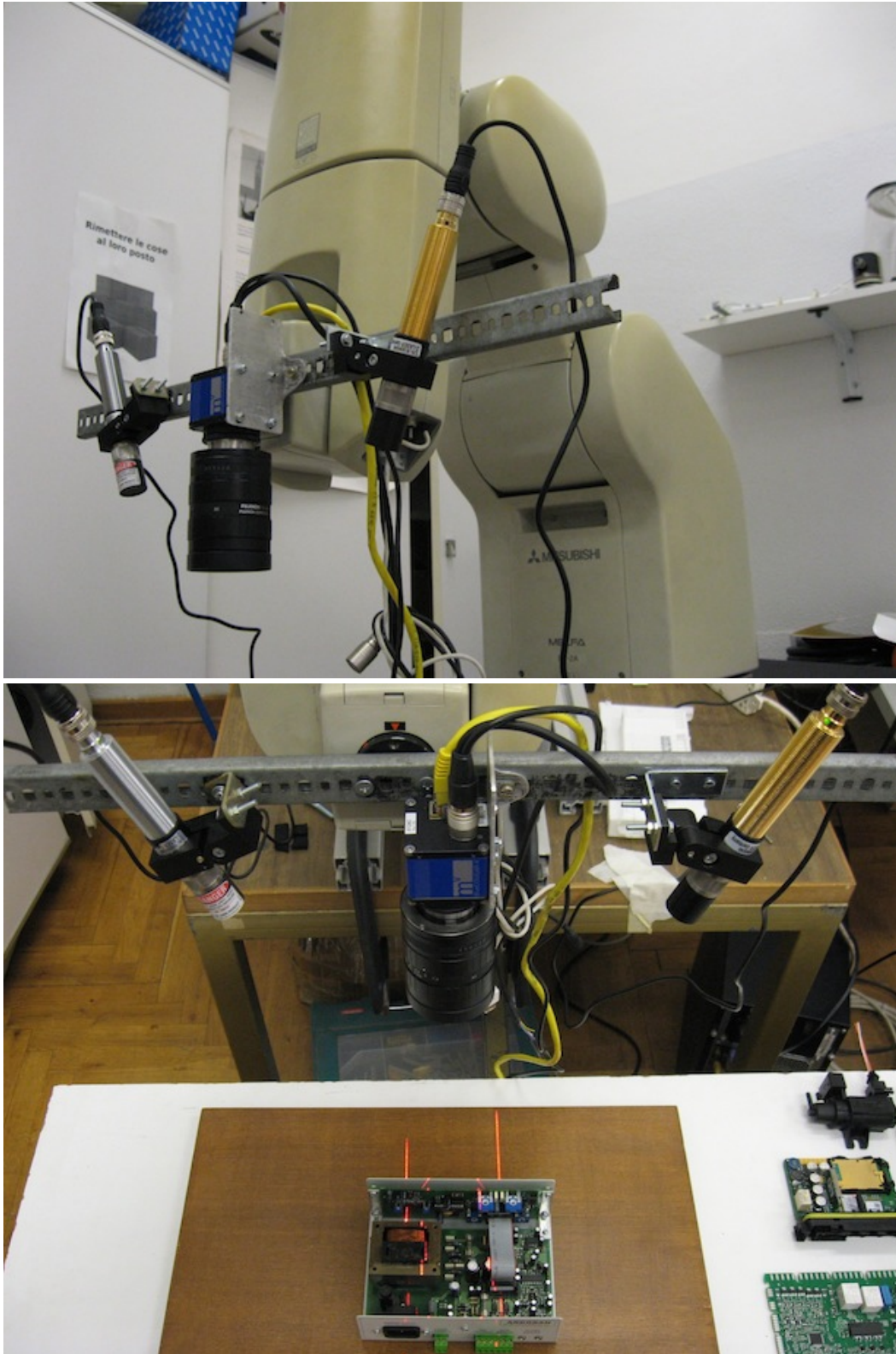


Figura 3.20: Prototipo del sistema di visione assemblato in laboratorio.

Capitolo 4

Il sistema di visione: Acquisizione ed elaborazione dei modelli 3D

Nel capitolo precedente, dopo aver riportato diversi esempi di tecnologie per l'acquisizione di informazioni 3D, sono state illustrate diverse configurazioni adatte al sistema progettato, mettendo in risalto la sua flessibilità nell'essere impiegato per l'applicazione a oggetti di diverse tipologie e dimensioni. Dal punto di vista hardware, quindi, il discorso è stato sufficientemente esaurito. L'obiettivo di questo capitolo, invece, è quello di analizzare la componente software, ovvero tutti i programmi e le procedure informatiche indispensabili per il funzionamento del sistema. Dopo aver presentato un'analisi generale, vengono illustrati i tool di calibrazione, la procedura di acquisizione dei dati e le funzioni che elaborano il modello dell'oggetto ispezionato.

L'analisi che verrà presentata nel seguito è relativa, in particolare, al funzionamento del prototipo realizzato durante il lavoro di tesi. Verranno anche approfondite eventuali modifiche necessarie per lo sviluppo del modello definitivo del sistema di visione.

Le routine software sono state sviluppate in forte collaborazione con i dottorandi Matteo Munaro e Stefano Michieletto. In particolare, Stefano ha lavorato principalmente nella parte relativa alla calibrazione del sistema di visione, con Matteo è stato curato lo sviluppo degli algoritmi per la costruzione dei modelli 3D, mentre io ho implementato la laser detection.

4.1 Rappresentazione del modello 3D

Oggetti tridimensionali possono essere rappresentati con equazioni operanti nel sistema di riferimento cartesiano tridimensionale. Un modello tridimensionale informatizzato si compone tramite la definizione di tre tipi di caratteristiche:

- la geometria (descrizione delle coordinate dei vertici);
- la topologia (descrizione delle relazioni di connessione tra componenti geometriche);

- la texture (descrizione di colori).

Gli oggetti sono generalmente rappresentati descrivendone le superfici elementari approssimanti nelle quali possono essere decomposti. Il metodo scelto nell'implementazione dell'algoritmo per il calcolo del modello 3D usa appunto l'approssimazione mediante poliedri (poligon mesh). La superficie dell'oggetto viene composta di facce triangolari (triangolazione). Maggiore è il numero di poligoni, migliore sarà la rappresentazione.

Vantaggi: l'approssimazione mediante facce triangolari è relativamente semplice, permette una buona modellazione degli oggetti ed è utilizzabile per la fase di rendering.

Svantaggi: comporta una cattiva approssimazione delle superfici naturali.

Per superare il problema delle superfici naturali, in output del programma di elaborazione saranno forniti i seguenti risultati/modelli:

- modello costituito come insieme di punti e descrizione delle facce triangolari, utile per la fase di rendering, se necessaria;
- mesh di punti equidistanti selezionati dal modello approssimato mediante poliedri;
- nuvola di punti tridimensionali forniti in output dalla funzione di triangolazione della linea laser.

Da questi modelli è possibile ottenere l'immagine di Range del modello, che rappresenta in scala di grigi le misure di profondità in ogni punto dell'immagine di un oggetto. Questa funzione sarà trattata nella Sezione 5.7 e verrà utilizzata negli algoritmi di controllo qualità.

Il programma dovrà fornire anche un'immagine di texture dell'intero oggetto acquisito, relazionata ai modelli 3D.

4.2 Analisi funzionale

Diverse sono le fasi che costituiscono la procedura di modellizzazione di un oggetto. Innanzitutto è necessario implementare le routine di interfacciamento con i componenti hardware del sistema, dove questo è necessario, o comunque gestirne il funzionamento. Sarà così possibile attuare l'acquisizione dei dati per poi passare all'ultima fase di elaborazione. In questa sezione si vuole riportare un'attenta analisi funzionale per individuare quali elaborazioni possono essere eseguite *online*, ovvero durante l'acquisizione, e quali *offline*, ovvero in un secondo momento.

Si possono individuare quattro importanti fasi, ognuna delle quali suddivisa a sua volta in diversi passi:

- programmazione dei movimenti del sistema (gestione del braccio meccanico per quanto riguarda il prototipo);

- calibrazione del sistema, definizione dei parametri intrinseci ed estrinseci dei componenti del sistema:
 - calibrazione della videocamera (parametri intrinseci);
 - geometria del sistema (posizioni reciproche di videocamera e laser, calcolo dei coefficienti del piano su cui è proiettata la linea laser);
 - stima della direzione del movimento del sistema di visione rispetto alla videocamera.
- acquisizione di un set di immagini 2D mentre il sistema è in movimento. Tali immagini costituiranno il data set in input al programma;
- tool di elaborazione, estrazione dei risultati:
 - estrazione della linea laser dal set di immagini;
 - calcolo della triangolazione per ottenere i profili con valori di profondità relativi al mondo reale;
 - merge dei profili sfruttando le informazioni estrinseche del sistema e la velocità di acquisizione delle immagini;
 - estrazione e applicazione della texture al modello 3D ottenuto.

I processi sopra riportati possono essere eseguiti in diverso ordine e modalità. A tal proposito si riporta nel seguito la procedura impiegata nel prototipo e uno schema di come dovrà essere poi riformulata per il sistema definitivo.

4.2.1 Prototipo

In fase prototipale si è cercato di abbreviare il più possibile i tempi utili al raggiungimenti di un primo risultato utilizzabile per il controllo di qualità. A tale scopo non è stato curato l'aspetto prestazionale degli algoritmi di elaborazione e le diverse fasi sono state eseguite, per quanto possibile, separatamente una dell'altra.

In particolare, il modello 3D viene elaborato offline, ovvero in un momento successivo rispetto all'acquisizione dei dati (le immagini con laser e texture).

Anche il robot manipolatore sarà programmato offline per eseguire un movimento ripetitivo e conosciuto a priori, ma in questo caso il programma è sostanzialmente lo stesso per tutte le acquisizioni (può essere necessario reimpostare solo alcuni valori, quali ad esempio la velocità si spostamento). Tali informazioni costituiscono quindi dati di input statici per il programma di elaborazione.

La calibrazione (così come per il sistema definitivo) dovrà essere eseguita offline, ed è necessaria solamente quando vengono variati i parametri estrinseci del sistema.

Si possono dunque distinguere cinque fasi temporalmente separate e così ordinate:

1. Programmazione dei movimenti;
2. Calibrazione del sistema;

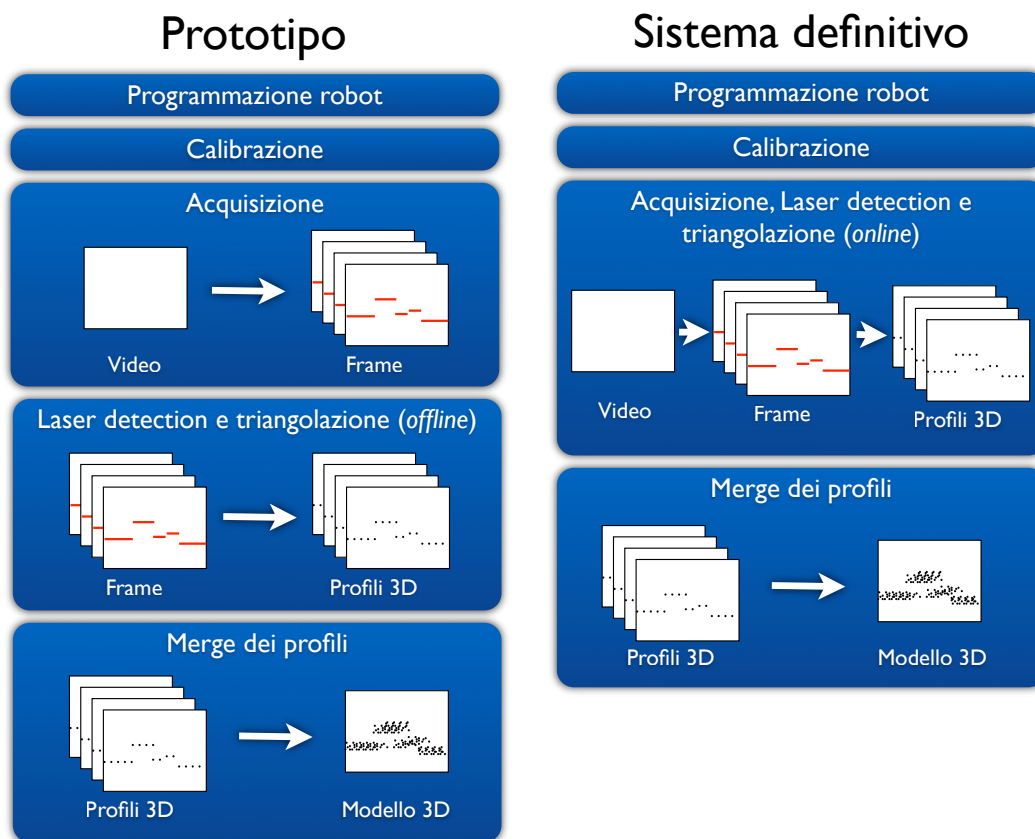


Figura 4.1: Schema funzionale del prototipo (a sinistra) e del sistema definitivo (a destra).

3. Acquisizione e memorizzazione della sequenza di immagini per il profilo (in condizione di buio) e della sequenza di immagini per la texture (in presenza di luce ambiente);
4. Estrazione della linea laser dalle immagini di profilo (offline);
5. Merge dei profili e presentazione dei risultati.

In Figura 4.1 è riportato uno schema a blocchi che illustra le suddette fasi.

4.2.2 Sistema definitivo

Il sistema definitivo dovrà essere ottimizzato in ogni sua parte per permettere la massima velocità di acquisizione e il minimo utilizzo di memoria. A tal fine è necessario eseguire online quante più elaborazioni possibili. Per esempio, l'estrazione della linea laser può avvenire su ogni immagine appena acquisita così che questa non debba essere salvata (nel prototipo viene invece memorizzata per procedere all'estrazione della linea in una fase successiva).

Si propongono di seguito quattro fasi temporalmente separate:

1. Programmazione dei movimenti;
2. Calibrazione del sistema;
3. Acquisizione immagini di profilo ed estrazione linea laser (online), acquisizione e memorizzazione immagini per texture, acquisizione parametri del movimento;
4. Merge dei profili e presentazione dei risultati.

In Figura 4.1 è riportato uno schema a blocchi che illustra le suddette fasi.

La configurazione proposta non è l'unica possibile. Vi è, ad esempio, la possibilità di unificare le fasi 3 e 4 eseguendo il merge dei profili non appena questi vengono elaborati. Tale possibilità è da verificare in base alla velocità di acquisizione della videocamera e ai tempi di elaborazione richiesti per ogni profilo (che dipendono dalle prestazioni del personal computer impiegato).

Un'altra nota importante è da fare in merito alla programmazione dei movimenti: in alcune applicazioni può non essere determinata a priori, ma deve essere letta in tempo reale in concomitanza con l'acquisizione di ogni profilo. Si pensi ad esempio ad un sistema così installato: videocamera e laser in posizione fissa e gli oggetti che scorrono su un nastro trasportatore. In tal caso il sistema deve, per ogni profilo acquisito, leggere la posizione del nastro tramite appositi encoder per parametrizzare i movimenti dell'oggetto e permettere una corretta ricostruzione nella fase di merge dei profili.

4.3 Ambiente di lavoro

L'attività di tesi e la realizzazione del prototipo del sistema di acquisizione è avvenuta all'interno dello IAS-LAB dell'Università di Padova. Per quanto riguarda l'hardware, il robot della Mitsubishi (vedi Sezione 3.4.1) è stato prestato al laboratorio, mentre videocamera, laser e alimentatori sono stati acquistati dal laboratorio con i fondi del progetto 3DComplete. Sono stati inoltre utilizzati i Personal Computer del laboratorio per la parte software di elaborazione. Ci occupiamo però ora del lato software: il programma di gestione del sistema definitivo dovrà essere sviluppato interamente in C++ per questioni di efficienza e portabilità. Nei primi test verrà però utilizzato Matlab, messo a disposizione dal Dipartimento di Ingegneria, che permetterà di sviluppare più rapidamente i tool di elaborazione.

4.3.1 Matlab

Matlab, il cui nome sta per *mat(rix) lab(oratory)*, è sia un linguaggio di programmazione (interpretato, non si compila) che un ambiente grafico di lavoro; entrambi gli aspetti sono molto integrati tra loro, così da fornire un supporto potente e intuitivo per il calcolo numerico. E' sviluppato dalla *MathWorks*, utilizza numerose librerie di calcolo (in particolar modo di algebra lineare) ed è considerato uno standard in ambienti universitari e professionali, in particolar modo nell'ambito ingegneristico. L'origine del nome deriva dal fatto che Matlab lavora fundamentalmente su matrici, nelle loro varie forme.

Il software è corredato di una famiglia di soluzioni specifiche per varie applicazioni denominate Toolbox. Si tratta di insiemi di funzioni MATLAB aggiuntive che estendono l'ambiente di lavoro per risolvere particolari categorie di problemi quali ad esempio sistemi di controllo, matematica finanziaria, acquisizione e elaborazione di immagini.

Esistono versioni per tutte le piattaforme: Windows, Macintosh, UNIX, CRAY. Viene distribuita inoltre una Student Edition.

Matlab è stato utilizzato per realizzare tutta la parte di elaborazione software, in quanto è risultato lo strumento più veloce per la realizzazione del prototipo. In un secondo momento il programma Matlab funzionante dovrà essere tradotto in un linguaggio di programmazione standard, in particolare in C++, per ottenere maggiori prestazioni e integrare tutte le fasi necessarie.

Per eseguire la calibrazione è stato utilizzato in primo luogo un toolbox per Matlab (vedi [20]) realizzato da Jean-Yves Bouguet, al tempo ricercatore presso il California Institute of Technology e attualmente Senior Software Engineer presso Google.

4.3.2 Visual Studio

Visual Studio è un un ambiente di sviluppo integrato (Integrated Development Environment o IDE) sviluppato da Microsoft, che supporta attualmente diversi tipi di linguaggio, quali C, C++, C#, Visual Basic .Net e ASP .Net, e che permette la realizzazione di applicazioni, siti web, applicazioni web e servizi web. È un RAD (Rapid Application Development), ovvero una applicazione atta ad aumentare la produttività aiutando il programmatore con mezzi come l'IntelliSense (che permette di correggere eventuali errori sintattici, ed alcuni logici, senza compilare l'applicazione) o il designer visuale delle form. Visual Studio è multiplatforma: con esso è possibile realizzare programmi per server, workstation, pocket PC, smartphone e, naturalmente, per i browser.

Possiede un potente debugger interno per il rilevamento e la correzione degli errori logici nel codice in runtime e fornisce diversi strumenti per l'analisi prestazionale.

Visual Studio è distribuito anche in versione Express Edition: si tratta di una versione gratuita dell'IDE della Microsoft. E' utile per studenti e principianti, utilizzabile anche per scopi commerciali, limitata su certi aspetti funzionali.

Visual Studio è stato impiegato per l'interfacciamento con la videocamera, e successivamente anche per l'elaborazione necessaria all'estrazione delle linee laser dalle immagini bidimensionali.

4.3.3 VirtualDub

VirtualDub è uno dei migliori software per l'editing video e audio. Con esso si possono acquisire video da sorgenti esterne, effettuare codifiche di file in formato .avi attraverso i codec MPEG4 (DivX, XviD, ecc.), comprimere flussi audio e video, unire più file .avi, dividere un file .avi in più parti, dividere un file video in sequenza di immagini, separare le tracce audio da quelle video, effettuare operazioni in batch,

e così via. Il programma è open source, quindi interamente gratuito, ma disponibile solo per piattaforme Windows.

VirtualDub è stato utilizzato per le prime acquisizioni, in fase di test, e per spezzare i video acquisiti in sequenza di immagini (una per ogni frame del video).

4.3.4 MeshLab

MeshLab è un software open source per la visualizzazione e la modifica di mesh 3D con strutturate triangolari.

Il programma è finalizzato all'elaborazione di modelli non strutturati provenienti da scansioni 3D. Fornisce un insieme di strumenti per l'editing, il rendering e la conversione di mesh.

Questo software è basato quasi interamente sulla libreria VCG, sviluppata presso il Visual Computing Lab di ISTI - CNR, per tutte le funzioni di elaborazione ed è disponibile per Windows, Mac OSX e Linux. MeshLab è nato nel 2005, scritto dalle mani di un gruppo di studenti dell'Università di Pisa nell'ambito di un corso di Computer Science. Gli studenti degli anni successivi si sono poi impegnati per aggiungere ulteriori funzionalità. Questo progetto è attivamente sostenuto da 3D-CoForm.

MeshLab è stato utilizzato per visualizzare i modelli 3D degli oggetti ispezionati.

4.4 Programmazione dei movimenti

In questa sezione viene illustrata la fase di programmazione del robot Melfa-RV2A della Mitsubishi impiegato per le acquisizioni eseguite in laboratorio.

L'idea consiste nel riprodurre una possibile condizione di funzionamento in ambiente industriale. Pensiamo ora al caso più comune di produzione di schede PCB assemblate. Queste scorrono su nastri trasportatori, su cui, in diversi passaggi, vengono montati e saldati i componenti superficiali (SMD) e i componenti tradizionali (PTH). Supponiamo ora che il sistema di visione sia installato in posizione fissa, nella parte finale del nastro trasportatore, dove passano le schede già assemblate. Su queste si vuole operare un controllo di completezza. Il sistema, dunque, sfrutta il movimento del nastro trasportatore, che in questa sede si suppone essere un moto rettilineo uniforme.

In laboratorio riproduciamo le stesse condizioni operative muovendo però il sistema di visione e mantenendo l'oggetto fisso. Il risultato, chiaramente, è equivalente ai fini dell'acquisizione.

Occorre programmare il robot manipolatore affinché compia ripetitivamente lo stesso movimento in linea retta e con velocità uniforme. Il sistema di acquisizione è vincolato al braccio meccanico in modo che le posizioni di videocamera e laser siano coerenti con la direzione del movimento.

In Figura 4.2 vengono rappresentati i movimenti del robot. Inizialmente questo si troverà in una posizione casuale, non conosciuta a priori. Da qui, il braccio dovrà portarsi in una posizione nota da cui avrà inizio la fase di movimentazione utile all'acquisizione dei singoli profili. Devono essere fissati due punti: il punto di partenza

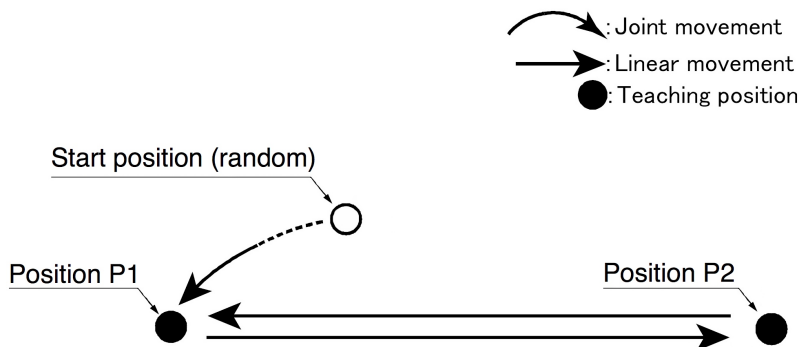


Figura 4.2: Schematizzazione dei movimenti del robot Melfa RV-2A per il prototipo del sistema di visione.

e quello di arrivo, che dovranno trovarsi alla stessa altezza dal piano di ispezione e ad una distanza tale da coprire la lunghezza degli oggetti più lunghi che si intende ispezionare.

Il robot è stato programmato usando il linguaggio MELFA BASIC IV tramite l'apposito Controller. Di seguito, con riferimento alla Figura 4.2, si riporta la lista di operazioni ordinate che dovrà continuare ad eseguire il robot (loop continuo):

1. Start
 - (a) Spostarsi dalla posizione iniziale, qualunque sia, in posizione P1 (movimento dei giunti);
 - (b) Portarsi in posizione P2 (movimento lineare);
 - (c) Portarsi in posizione P1 (movimento lineare);
2. End

Il programma, una volta avviato il robot, verrà eseguito in loop continuo, che risulta in uno spostamento continuo dalla posizione P1 a P2 e ritorno. Di seguito si riporta il listato completo in linguaggio MELFA BASIC IV:

Algorithm 4.1 Programma robot Melfa-RV2A per prototipo.

```

10 SPD 50          // Imposta la velocità a 50mm/s
20 MOV P1          // Movimento (di giunti) fino a P1
30 DLY 1.0         // Aspetta 1 secondo
40 SPD 20          // Imposta la velocità a 20mm/s
50 MVS P2          // Movimento (lineare) fino a P2
60 DLY 1.0         // Aspetta 1 secondo
70 MVS P1          // Movimento (lineare) fino a P1
80 DLY 1.0         // Aspetta 1 secondo
90 END

```

4.5 Calibrazione

In molti casi, le performance di un sistema di visione industriale dipendono fortemente dall'accuratezza posta nella fase di calibrazione.

Come anticipato in precedenza, oltre alla calibrazione della videocamera, il sistema di visione realizzato necessita di una routine di calibrazione per determinare la posizione del laser e la sua inclinazione rispetto alla videocamera. Parametri, questi, che influiscono sui risultati della triangolazione. Importante è anche stimare la direzione del movimento del sistema rispetto alla videocamera. Nel seguito vengono analizzate separatamente le procedure di calibrazione.

4.5.1 Videocamera

Nel contesto della visione industriale 3D la calibrazione è il processo che permette di determinare la geometria interna di una videocamera e le sue caratteristiche ottiche (parametri intrinseci) e/o la posizione 3D e l'orientazione del piano immagine in relazione a un determinato sistema di coordinate del mondo reale (parametri estrinseci).

L'idea è che, conoscendo le proiezioni di punti 3D di coordinate note, sia possibile ottenere i parametri incogniti risolvendo le equazioni della proiezione prospettica.

I parametri intrinseci della videocamera che si intendono calcolare sono i seguenti:

Focal length: Lunghezza focale (espressa in pixel) della videocamera.

Principal point: Coordinate del punto centrale dell'immagine. È il punto in cui l'asse ottico della videocamera attraversa il piano immagine.

Distortions: Coefficienti di distorsione dell'immagine (distorsione radiale e tangenziale).

I parametri, nei primi test, sono stati calcolati mediante il toolbox per Matlab realizzato da Jean-Yves Bouguet (vedi [20]). È necessario, a tal fine, acquisire una serie di immagini con la videocamera in cui viene ripresa una scacchiera con diverse distanze e inclinazioni. Per calibrare il prototipo del sistema sono state acquisite 30 immagini (vedi Figura 4.3). Il toolbox richiede inoltre l'inserimento di alcuni parametri quali le dimensioni e il numero dei quadrati e successivamente elabora le immagini per calcolare lunghezza focale, punto centrale dell'immagine e coefficienti di distorsione. Il toolbox fornisce anche una visualizzazione delle scacchiere acquisite, disposte nel sistema di riferimento della videocamera (vedi Figura 4.4) e il modello della distorsione calcolata (vedi Figura 4.5).

4.5.2 Piano laser (parametri estrinseci)

Ai fini della triangolazione, come vedremo successivamente, è necessario conoscere con precisione la disposizione reciproca di videocamera e laser. Si prenda come sistema di riferimento quello della videocamera, con assi x e y paralleli al piano immagine e z perpendicolare. L'obiettivo consiste nel calcolare i coefficienti del piano di proiezione della luce laser. Nei primi test il piano è stato stimato manualmente

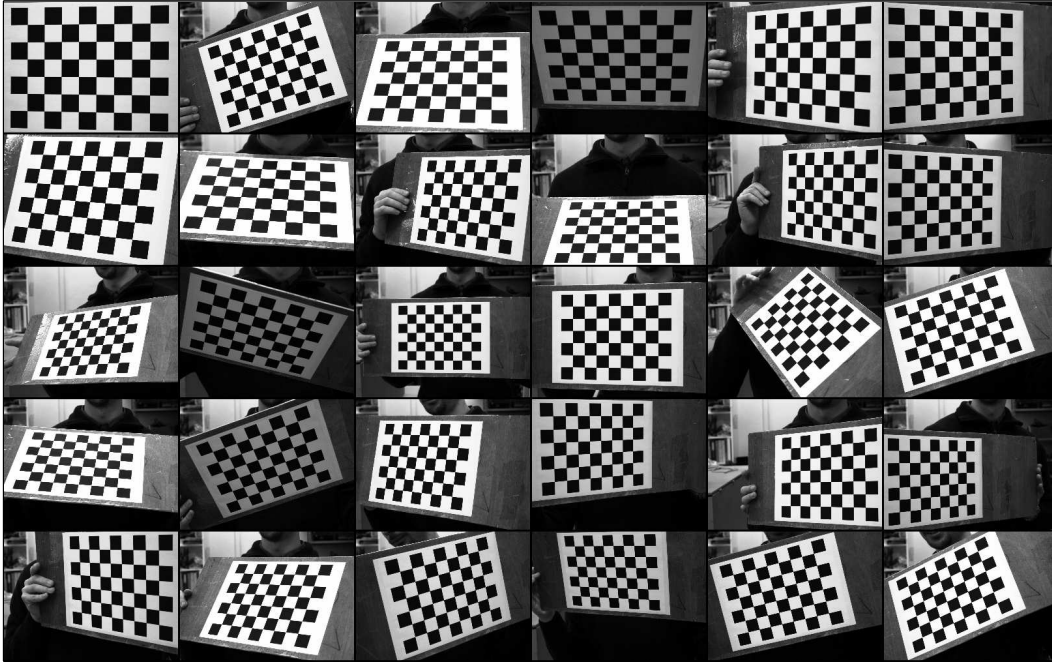


Figura 4.3: Set di immagini per la calibrazione.

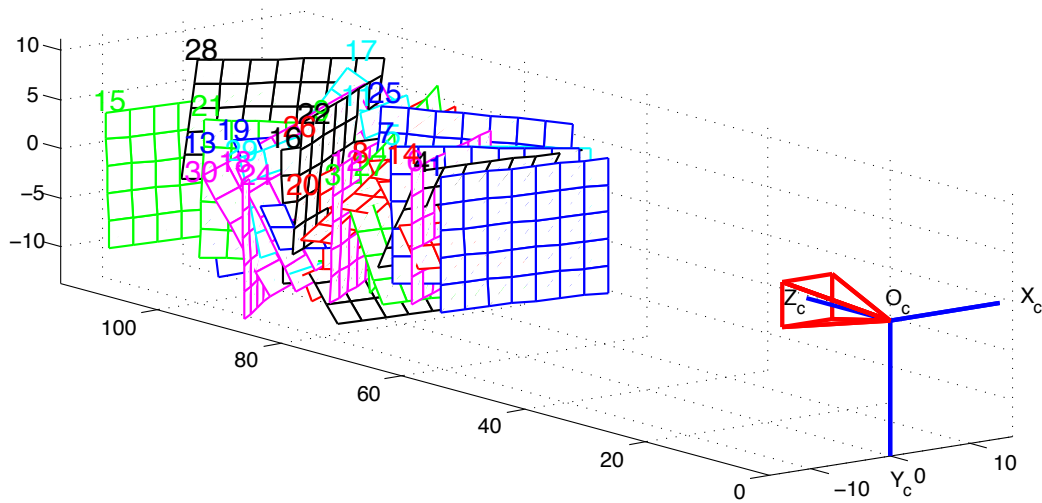


Figura 4.4: Disposizione delle scacchiere nel sistema di riferimento della videocamera.

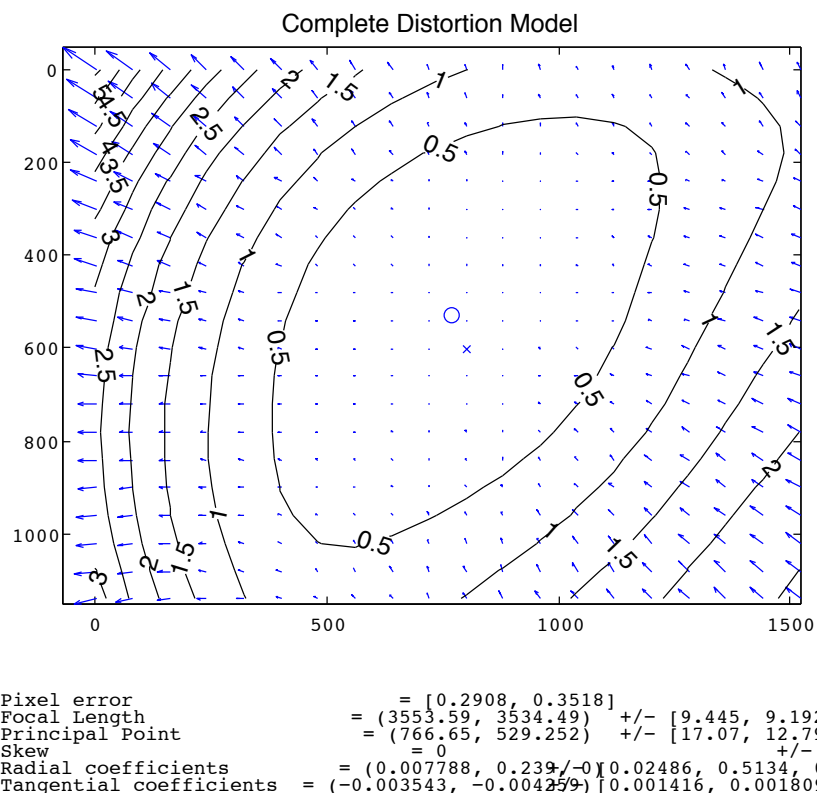


Figura 4.5: Modello della distorsione e risultati della calibrazione della videocamera con ottica 1:2.0/15mm.

misurando la distanza tra laser e videocamera e l'inclinazione tra i rispettivi assi. Chiaramente, in questo modo, non si ottiene un'elevata precisione in quando non si può stabilire la posizione dello 0 della videocamera (l'origine degli assi nel sistema di riferimento della videocamera).

Per ovviare a questo problema è stato sviluppato un tool automatico. Conoscendo i parametri intrinseci della videocamera e analizzando una serie di immagini della stessa scacchiera, utilizzata in fase di calibrazione della videocamera, in cui compaia anche la linea laser, il tool stima i parametri corretti del piano laser. Il principio utilizzato è semplice: a partire da ogni immagine, vengono ricavati i punti 3D in cui compare il laser basandosi sulla geometria della scacchiera e viene rappresentata l'unione dei punti estratti dalle diverse immagini. Tale rappresentazione è una nuvola di punti che risiedono nel piano di proiezione del laser. Vengono quindi stimati i parametri del piano che meglio approssima tutti i punti. La procedura è la seguente:

1. Applicazione dell'algoritmo RANSAC per escludere eventuali outlier;
2. Stima dei coefficienti del piano col metodo dei minimi quadrati sui punti considerati inlier al punto 1.

4.5.3 Direzione di avanzamento

Un altro fattore che influisce negativamente sulla qualità del modello consiste in una stima errata della direzione di avanzamento del sistema di visione. Videocamera e laser sono vincolati al braccio meccanico che li muove lungo una direzione rettilinea per acquisire in successione i profili dell'oggetto. Si è supposto quindi che il movimento avvenga lungo un asse. Se però il sistema (in particolare la videocamera) non è perfettamente allineato con la direzione di avanzamento, non è più possibile rappresentare lo spostamento lungo una sola direzione. Il moto resterà comunque di tipo rettilineo uniforme, ma l'importante è stimare la direzione rispetto al sistema di riferimento della videocamera.

A questo scopo è stato sviluppato un tool: è sufficiente acquisire due immagini di una stessa scacchiera (posta in posizione fissa) in due posizioni diverse del sistema. Il programma calcola le posizioni della videocamera rispetto alla scacchiera e successivamente lo spostamento tra le due posizioni di acquisizione. Da questi dati viene stimato lo spostamento lungo gli assi x , y e z nel sistema di riferimento della videocamera.

In Figura 4.6 sono riportate le immagini usate per questa fase di calibrazione.

4.6 Acquisizione profili e texture

Come ampiamente spiegato in precedenza, la fase di acquisizione consiste nel registrare una sequenza di immagini, una per ogni profilo dell'oggetto ispezionato. In fase di test ogni acquisizione si compone di due passi, eseguiti in due momenti successivi, e di seguito descritti:

1. La prima volta che il sistema, mosso dal braccio meccanico, passa sopra l'oggetto, vengono acquisite e registrate le immagini utili all'estrazione della linea

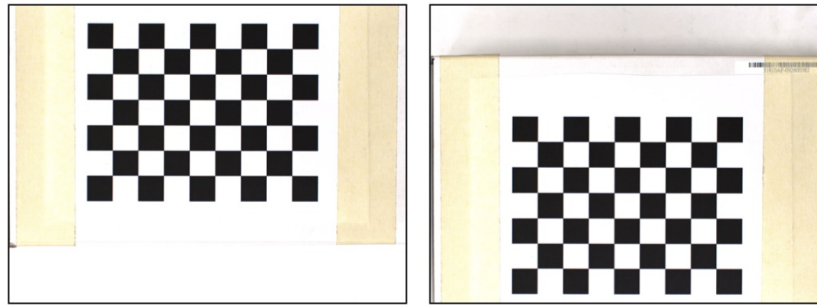


Figura 4.6: Immagini utilizzate per la stima della direzione di avanzamento: la scacchiera ha una posizione fissa, mentre il sistema di visione viene spostato.

laser. In laboratorio questo passo è stato eseguito con balconi e finestre chiuse e a luci spente per ricreare le condizioni operative di una camera oscura. Come spiegato nel capito precedente, infatti, il processo di estrazione della linea dalle immagini risulta maggiormente preciso se la sorgente di luce prevalente è il laser.

2. La seconda acquisizione è necessaria per registrare la texture di ogni profilo. In questo caso, le immagini vengono prese con tutte le luci del laboratorio accese, per simulare una luce diffusa. Ovviamente le luci possono creare riflessi o zone d'ombra in base alla loro disposizione, ma la qualità così ottenuta, almeno in fase di test, è risultata sufficiente.

La fase di acquisizione, all'apparenza immediata e semplice, sfrutta molte risorse di memoria. La videocamera fornisce in output una sequenza di immagini ad una certa frequenza. Il problema maggiore consiste nella memorizzazione di queste immagini in un supporto fisso. Tale operazione è dispendiosa in termini di occupazione di memoria. L'accesso al disco fisso del PC, inoltre, non è sufficientemente veloce per permettere la memorizzazione di immagini durante l'acquisizione. Il problema si può risolvere parzialmente registrando su disco fisso un flusso video, che risulta meno dispendioso rispetto alla memorizzazione di tutti i singoli frame in file diversi. La velocità di acquisizione non può comunque essere molto elevata.

Le alternative a questo problema sono due: la prima consiste nell'immagazzinare temporaneamente le immagini in memoria RAM (la cui velocità di scrittura è di molto superiore a quella dell'HD) e memorizzarle nel disco fisso al termine della scansione dell'oggetto, mentre la seconda consiste nell'elaborare le immagini in real-time, ovvero, estrarre da ogni immagine acquisita il profilo e calcolarne la triangolazione. In quest'ultimo modo non vi è più la necessità di memorizzare l'immagine appena acquisita, che può quindi essere scartata.

La seconda soluzione è quella che dovrà essere implementata nel sistema definitivo. Per quanto riguarda il prototipo, le prime acquisizioni sono state eseguite memorizzando due flussi video (uno per l'estrazione del laser e uno per la texture) e suddividendoli in immagini in un secondo momento.

Per la registrazione dei video è stato sviluppato un programma dedicato in linguaggio C++ che fa uso delle librerie della videocamera (vedi Sezione 3.2.2.1). Per suddividere il flusso video è stato usato Virtul Dub (vedi Sezione 4.3.3).

Un inconveniente dovuto all'esecuzione delle acquisizioni in due passate, una per il laser e una per la texture, sta nel dover poi sincronizzare i due set di immagini. Tale operazione può essere eseguita automaticamente dal tool di acquisizione conoscendo i parametri temporali del ciclo di movimento del robot manipolatore. In fase di test, tale operazione è stata eseguita manualmente, dopo aver suddiviso il video in frame.

Algorithm 4.2 Pseudocodice dell'algoritmo di elaborazione.

INPUT: Set di immagini con laser e texture.

OUTPUT: Modello dell'oggetto composto dall'insieme di punti 3D e dall'immagine di texture.

- Per ogni immagine:
 - **Laser detection:**
 - * Per ogni colonna, cerca il pixel centrale della linea laser e salvalo in un array (si ottiene un punto in coordinate (x, y) nel piano immagine, ovvero in pixel)
 - **Triangolazione:**
 - * Per ogni punto laser nell'array calcola il rispettivo punto in coordinate 3D nel sistema di riferimento della videocamera
 - **Stima posizioni di acquisizione:**
 - Ad ogni frame, associa la posizione di acquisizione (si devono conoscere la direzione di spostamento del sistema, la velocità di avanzamento e la velocità di acquisizione in fps della videocamera)
 - **Composizione del modello:**
 - Merge dei punti 3D di ogni profilo (utilizza le informazioni sulla posizione di acquisizione di ogni profilo)
 - Eliminazione outlier
 - Costruzione delle facce del modello
 - Associazione della texture ad ogni faccia
 - Semplificazione
 - Presentazione dei risultati
-

4.7 Tool di elaborazione in Matlab

In questa sezione vengono descritte le funzioni lato software che eseguono le operazioni di calcolo utili alla costruzione del modello. I dati di input sono quindi le immagini 2D così come sono state acquisite dalla videocamera, senza alcuna fase di pre-elaborazione. I programmi sono stati interamente sviluppati in Matlab. Sarà quindi necessario eseguire il porting da Matlab a C++ per migliorarne le prestazioni.

4.7.1 Descrizione funzionale

Per meglio illustrare il processo di elaborazione software, viene riportato lo pseudocodice nell'Algoritmo 4.2.

L'algoritmo è complesso e si compone principalmente di tre fasi: estrazione del laser e calcolo della triangolazione per ogni profilo, calcolo delle posizioni di acquisizione dei singoli profili, composizione del modello 3D dell'oggetto ispezionato. Come si evince dall'algoritmo, si vogliono ottenere due risultati: l'immagine di texture e l'insieme di punti 3D, messi in relazione tra loro.

È bene notare che i passi Laser detection e Triangolazione sono rappresentati separatamente anche se vengono eseguiti in parallelo. La suddivisione può essere utile nel caso si richieda una velocità di acquisizione che non permette l'esecuzione di tutti i calcoli in real time. In tal caso, durante l'acquisizione può essere eseguito esclusivamente il passo di laser detection, mentre la triangolazione può essere calcolata offline.

I passi più importanti sono evidenziati in grassetto nell'algoritmo e verranno trattati nel dettaglio nei seguenti paragrafi.

4.7.2 Laser detection

Obiettivo della funzione di Laser detection è fornire in output, per ogni immagine (profilo) una lista di punti bidimensionali, in coordinate immagine, in cui compare la luce laser. Questa fase include anche una procedura per l'eliminazione di eventuali outlier (dovuti ad esempio a riflessi del laser) e una per la correzione della linea risultante. Nel seguito vengono analizzati separatamente questi aspetti.

Estrazione linea laser

Essendo la luce laser una linea, spezzata in base alle caratteristiche geometriche dell'oggetto ispezionato, il principio su cui si basa il funzionamento consiste nel cercare, per ogni colonna, un pixel che rappresenta la linea, ovvero con caratteristiche riconducibili alla luce del laser. Come anticipato, le caratteristiche principali della luce laser sono il colore rosso e la forte intensità, che si traduce in un'elevata luminosità.

Nell'identificazione è necessario anche verificare la condizione che il pixel appartenga ad una linea orizzontale, ovvero perpendicolare rispetto alla colonna in cui viene identificato (nel nostro caso, infatti, si tratta di superfici prevalentemente piane): significa quindi che, nella colonna, il valore rappresentante la linea sarà localizzato in pochi pixel.

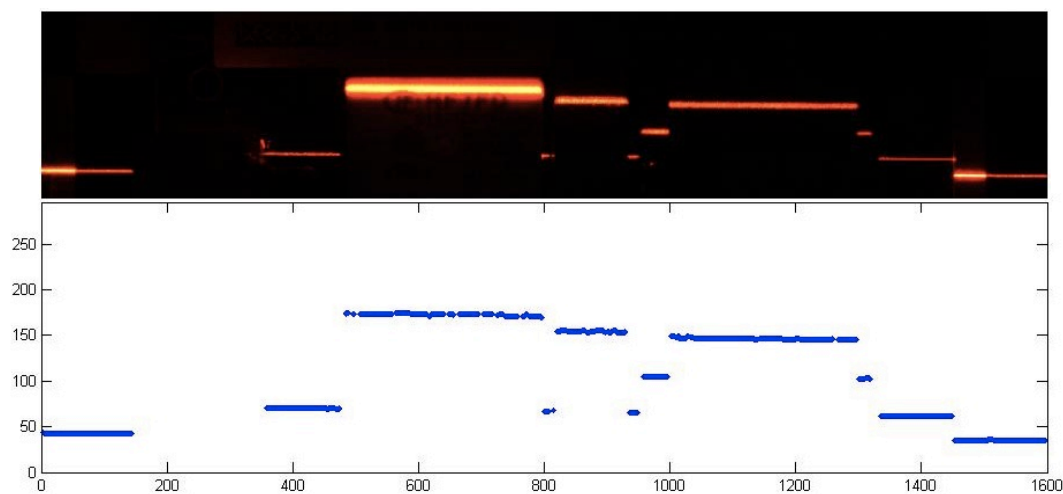


Figura 4.7: Risultato della detection della linea laser per un profilo.

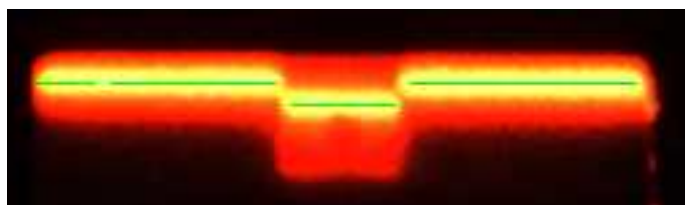


Figura 4.8: Esempio di segmento linea laser e detection (in verde).

Un altro problema, risolto dall'algoritmo di identificazione del laser, è dovuto allo spessore della linea: esso varia in funzione del tipo e del colore della superficie su cui viene proiettato il laser (nelle superfici nere, ad esempio, lo spessore della linea risulterà più ristretto in quanto esse tendono ad assorbire la luce). Generalmente l'intensità del colore è maggiore nel punto centrale della linea, ma in alcuni casi, soprattutto sulle superfici bianche, il colore di tutta la linea satura, per cui i valori di colore e luminosità risultano uguali su tutto lo spessore della linea. L'algoritmo sviluppato identifica in ogni caso la linea restituendo il pixel che appartiene al suo punto medio.

In Figura 4.7 viene riportato un esempio di estrazione della linea laser per un profilo.

In Figura 4.8 viene riportato un segmento di linea laser, dove il risultato dell'identificazione è rappresentato dai pixel colorati in verde. Nel primo grafico di Figura 4.9 viene riportato il relativo risultato ottenuto dalla funzione di detection del laser.

Eliminazione degli outlier sul singolo profilo

In fase di detection è stata inserita una routine per l'eliminazione di eventuali punti anomali, identificati erroneamente come linea laser. Ogni punto della lista ottenuta, viene confrontato con i punti delle colonne più vicine a destra e sinistra e viene

Algorithm 4.3 Estrazione punti laser

```

INPUT:  Img = immagine 2D
          RED_THRESHOLD = Soglia rosso
          GREEN_THRESHOLD = Soglia verde

OUTPUT: yLaser() = Lista contenente, per ogni colonna (indice della lista)
                  il valore della coordinata y dell'immagine in cui viene
                  identificata la linea laser.

FOR EACH colonna x di Img
    y_valMax = 0;
    valMax = 0;
    spessoreLinea = 0;
    supporto = 0;

    FOR EACH riga y di Img
        IF il pixel (x, y) ha valore di rosso maggiore di RED_THRESHOLD e
        di verde maggiore di GREEN_THRESHOLD THEN

            supporto++;
            valAttuale = somma dei valori RGB del pixel (x, y);

            IF valAttuale > valueHi THEN
                spessoreLinea = 1;
                y_valMax = y;
                valMax = valAttuale;

            ELSE IF valAttuale == valMax THEN
                IF spessoreLinea == 0 THEN
                    y_valMax = y;
                ELSE
                    y_valMax = y_valMax + y;
                END
                spessoreLinea = spessoreLinea + 1;

            ELSE IF spessoreLinea > 0 THEN
                y_valMax = y_valMax/spessoreLinea;
                spessoreLinea = 0;
            END

            ELSE IF spessoreLinea > 0 THEN
                y_valMax = y_valMax/spessoreLinea;
                spessoreLinea = 0;
            END

        END

    IF supporto >= 3 THEN
        yLaser(x) = y_valMax;
    END
END

```

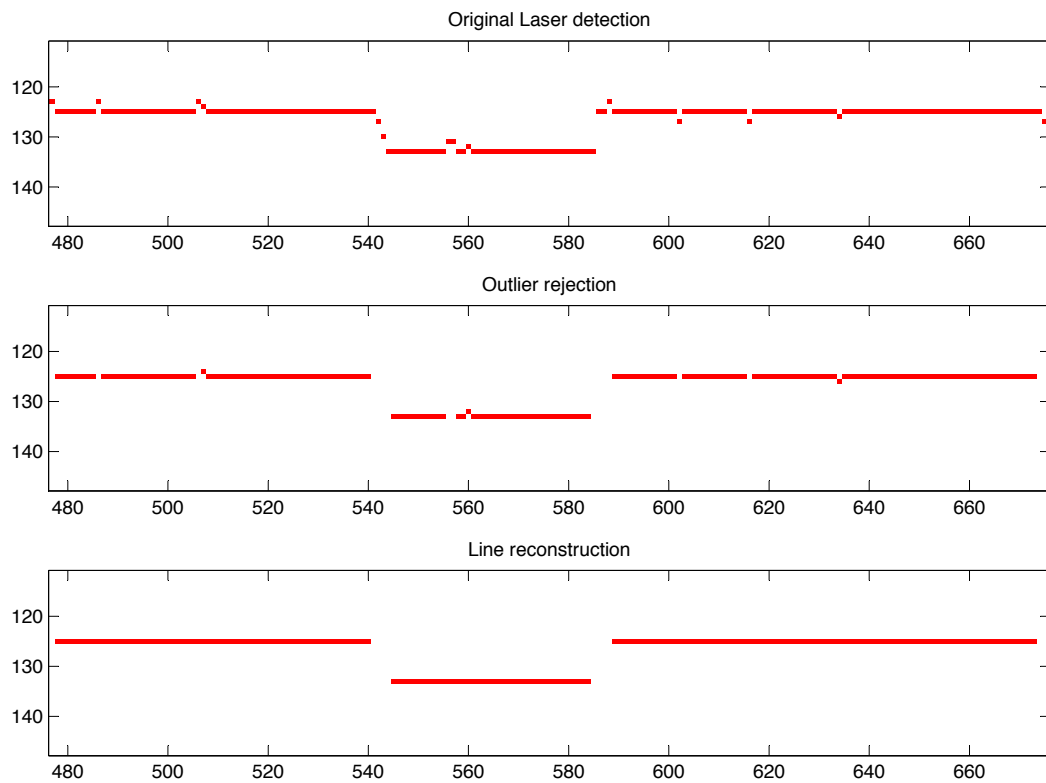


Figura 4.9: Detection della linea laser di Figura 4.8 (sopra), eliminazione degli outlier (al centro) e ricostruzione della linea (sotto).

eliminato se i valori sono discordanti. Questo è possibile in quanto un solo pixel rappresenta una zona molto piccola della linea e quindi non può trovarsi isolato da tutti gli altri.

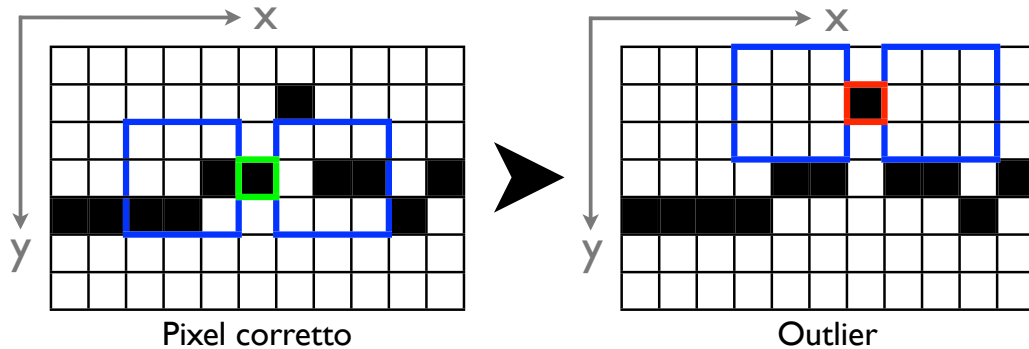


Figura 4.10: Esempio eliminazione outlier sul profilo. Punto identificato correttamente (a sinistra), e identificazione outlier (a destra): tale punto verrà escluso dai risultati.

In Figura 4.10 viene illustrato il funzionamento con un esempio: a sinistra è rappresentata l'identificazione di un pixel corretto, ovvero veramente appartenente alla linea, mentre a destra il caso di un pixel considerato outlier. L'algoritmo conta il numero di pixel appartenenti alla linea nei due riquadri blu adiacenti al pixel in esame (di dimensione 3x3 pixel). Se il numero di pixel appartenenti alla linea in queste due zone superano una certa soglia (ad esempio 3) allora il pixel viene considerato corretto e accettato, altrimenti viene escluso dalla lista dei risultati. La dimensione dei riquadri blu e il valore della soglia utile per considerare un pixel non outlier possono essere scelti in funzione del tipo di oggetto ispezionato e della sua forma.

Nel secondo grafico di Figura 4.9 viene riportato un esempio del risultato ottenuto in seguito alla rimozione degli outlier.

Filtro di correzione della linea

La routine di eliminazione degli outlier contribuisce ad aumentare la discontinuità della linea. Altri elementi di discontinuità possono essere dovuti a riflessi o imperfezioni sull'identificazione della linea (essendo la linea in alcuni casi molto spessa, il centro potrebbe non essere ben stimato). Partendo dall'ipotesi che gli oggetti ispezionati sono composti da superfici prevalentemente piane, si può supporre che la ricostruzione della luce laser dovrà risultare una linea spezzata formata da tanti segmenti orizzontali.

È stata introdotta allora una funzione allo scopo di verificare l'ipotesi sopra riportata. Si consideri la lista di punti laser ordinata e rappresentata in una griglia corrispondente ai pixel dell'immagine originale. La funzione esegue i seguenti tre step correttivi:

1. Per ogni colonna dell'immagine, se l'altezza del laser nella colonna precedente è uguale a quella della colonna successiva, ma diversa da quella in esame (anche nel caso questa sia assente), allora imposta lo stesso valore (vedi il primo esempio in Figura 4.11).
2. Per ogni gruppo di due colonne consecutive, esegue il controllo del punto 1 (vedi il secondo esempio in Figura 4.11). Viene eseguito in cascata al punto 1.
3. Per ogni gruppo di tre colonne successive, esegue il controllo del punto 1 (vedi il secondo esempio in Figure 4.11). Viene eseguito in cascata al punto 2.

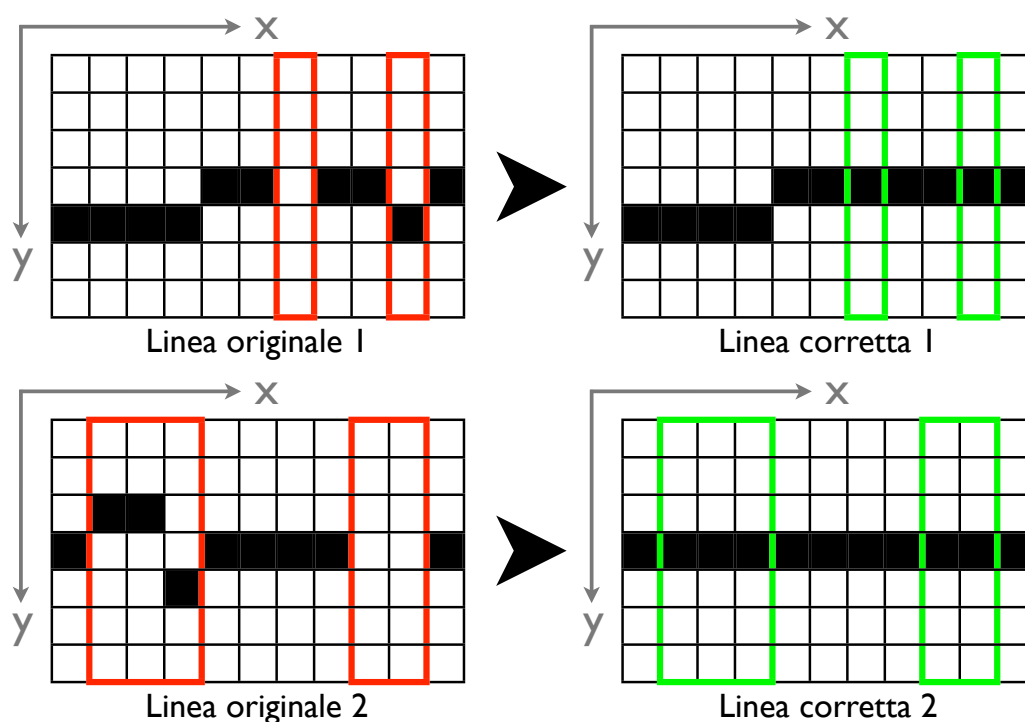


Figura 4.11: Esempio di correzione della linea laser identificata.

Nel terzo grafico di Figura 4.9 viene riportato un esempio del risultato ottenuto in seguito all'applicazione del filtro di ricostruzione della linea laser.

4.7.3 Triangolazione laser

Per stimare la posizione 3D di ogni punto laser di un profilo è necessario conoscere i parametri intrinseci della videocamera (lunghezza focale e punto centrale dell'immagine) e i parametri estrinseci con cui è configurato il sistema videocamera-laser, ovvero l'equazione del piano laser nel sistema di riferimento della videocamera. Tali parametri sono già noti grazie alla fase di calibrazione.

La posizione 3D dei punti laser può essere calcolata tramite i seguenti due passi:

1. La posizione 2D di ogni punto del laser individuato nelle immagini viene riportata nel sistema di riferimento 3D della videocamera: a tal scopo occorre sottrarre le coordinate del punto centrale dell'immagine e aggiungere come terza dimensione il valore della lunghezza focale.
2. Per ogni punto ottenuto, dall'intersezione tra la retta passante per il centro ottico della videocamera e tale punto con l'equazione del piano laser, si ricava la posizione 3D reale del punto laser. Questo costituisce il vero passo di triangolazione.

Al termine di questa procedura si ottiene quindi il set di profili, ognuno costituito dai punti 3D reali.

In Figura 4.12 viene riportato, a titolo di esempio, il risultato della triangolazione effettuata su un profilo: nell'immagine sono rappresentati i sistemi di riferimento della videocamera (punto C blu) e del laser (punto L rosso), il piano immagine con la rilevazione del profilo laser (griglia grigia e detection laser in blu) ed il profilo 3D risultante dalla triangolazione.

4.7.4 Stima posizioni di acquisizione

In questo passo, si vuole stabilire la posizione esatta in cui è stato acquisito ogni singolo profilo. Tali informazioni, come vedremo, saranno impiegate nella fase successiva per la composizione del modello risultante.

In base al funzionamento del sistema, si possono distinguere due casi: si conoscono a priori i movimenti del sistema (o eventualmente dell'oggetto ispezionato) oppure si devono dedurre dalla lettura di appositi encoder. Nel primo caso (così come per il prototipo), il calcolo delle posizioni può avvenire ad ogni acquisizione, oppure offline. Nel secondo caso, invece, è necessario che i valori del/degli encoder siano letti ad ogni acquisizione, nel momento stesso in cui viene registrato il relativo frame.

Nel programma sviluppato, come si evince dall'Algoritmo 4.2, tale operazione viene eseguita offline: date la velocità di spostamento, la velocità di acquisizione della videocamera e la direzione di spostamento, cioè vengono calcolate le matrici di rototraslazione che riferiscono ciascun profilo 3D ad un unico sistema di riferimento, il sistema "mondo". Così è possibile mettere insieme in maniera coerente i profili di punti 3D estratti da ogni frame e comporre il modello 3D complessivo.

4.7.5 Composizione del modello

È questa la fase computazionalmente più complessa. Di seguito viene analizzata per punti.

Merge punti 3D

Obiettivo di questa fase è unire le informazioni dei singoli profili. Conoscendo le posizioni di acquisizione di ogni frame, è possibile creare una lista contenente tutti i

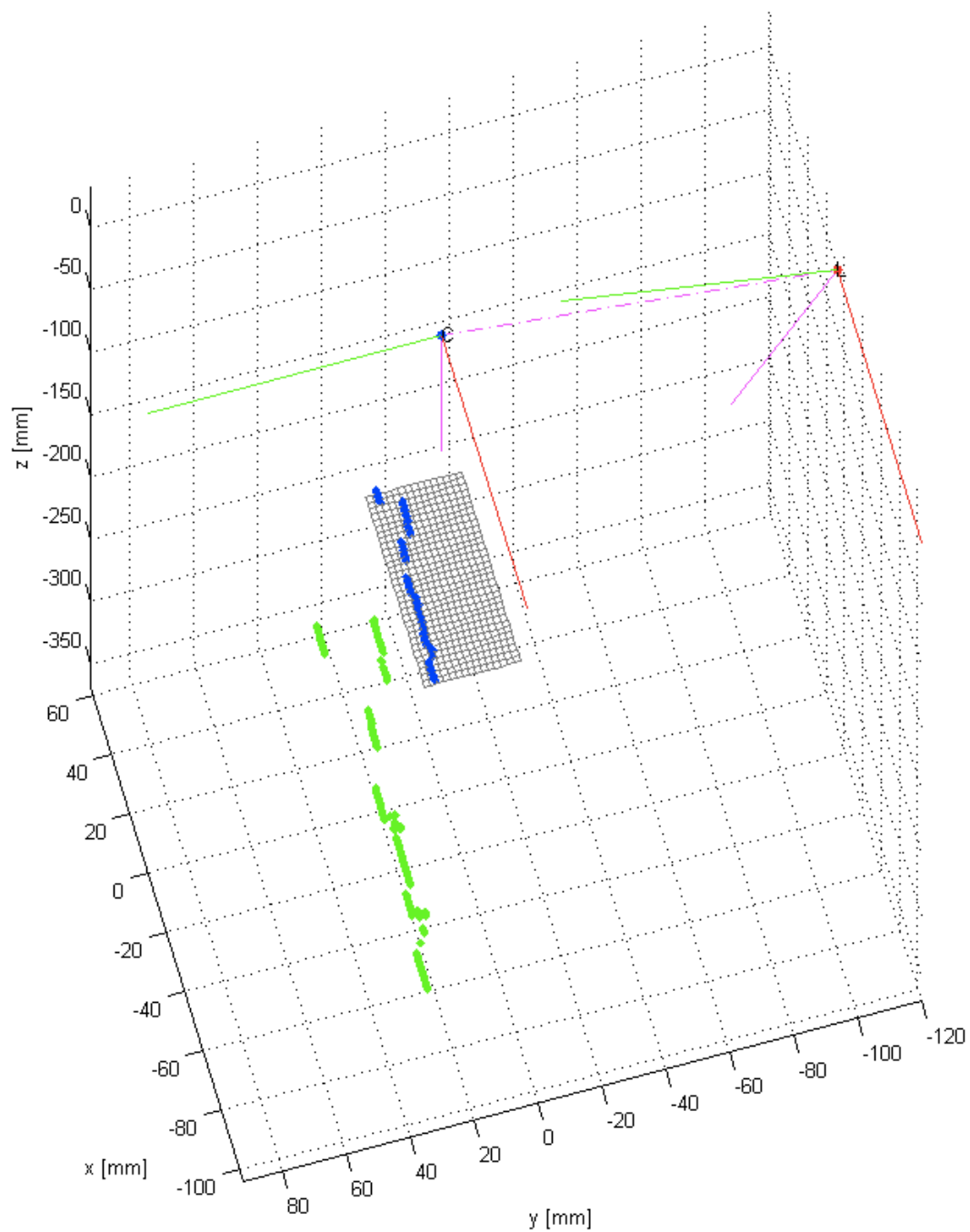


Figura 4.12: Triangolazione di un profilo con rappresentazione dei sistemi di riferimento della videocamera e del laser, e visualizzazione del piano immagine.

punti che descrivono la forma dell'oggetto: si ottiene così il modello 3D come nuvola di punti (shape 3D).

Registrazione

Nel caso il sistema faccia uso di più laser (il prototipo ne conta due) occorre a questo punto unire i modelli ricostruiti a partire dalle misure dei diversi laser. Ipotizzando ottima la fase di calibrazione è sufficiente unire i modelli sovrapponendo le nuvole di punti ottenute nella fase precedente. I risultati ottenuti (vedi Sezione D.2) mostrano invece un evidente scostamento tra i due modelli. Sarà necessario, nei prossimi sviluppi del progetto, correggere la registrazione dei modelli. A tal scopo si suggerisce l'utilizzo del metodo *Iterative Closest Point (ICP)* per calcolare la matrice di rototraslazione che consenta la migliore sovrapposizione dei modelli.

Eliminazione outlier

Il modello costruito può essere affetto da errori. Alcuni outlier (punti errati dovuti per esempio a riflessi della linea laser su superfici lucide e/o riflettenti) non sono visibili nel singolo profilo, ma risultano evidenti nel modello 3D. L'eliminazione viene eseguita distribuendo tutti i punti in un istogramma, suddivisi in valori discreti sulla componente z (delle altezze) e, successivamente, vengono eliminati i punti il cui numero, in una regione dell'istogramma, è inferiore ad una determinata soglia.

I punti accettati vengono forniti in output al programma e rappresentano la forma del modello 3D.

Triangolazione di Delaunay

I punti calcolati nei passi precedenti costituiscono il modello 3D. È possibile, però, che il laser non sia stato ben identificato in tutti i punti e quindi il modello 3D risulti incompleto, ovvero presenta zone in cui non vi sono informazioni 3D. Prima di applicare la texture alla superficie, si vuole costruire un modello "pieno": l'idea consiste nel creare delle facce che uniscano tutti i punti 3D per colmare le zone in cui mancano informazioni. Successivamente la texture viene applicata alle facce, anziché ai singoli punti.

Per costruire le facce del modello 3D viene utilizzata la triangolazione di Delaunay sulle coordinate (x, y) dei punti (bidimensionalmente). Questa tecnica consente la costruzione di facce triangolari, in cui triangoli adiacenti rispettano determinati parametri di forma.

Applicazione della texture al modello 3D

Le immagini vengono proiettate sul modello mappando, in ogni faccia triangolare, le informazioni di texture dall'immagine in cui essa è più vicina al centro, che è la zona dove la distorsione è minore. Grazie a questo accorgimento la texture del modello risulta essere una fusione coerente di tutte le immagini.

Semplificazione della mesh

Tipicamente le maglie possono essere, se molto accurate, computazionalmente troppo onerose da gestire. È quindi importante poterle semplificare se necessario. A partire dal modello 3D con le superfici viene creata una mesh direttamente proporzionale all'immagine di texture, il cui numero di punti è impostabile a piacere, così da ottenere un modello 3D semplificato e in relazione diretta con le informazioni di colore.

Memorizzazione dei risultati

In output, il programma fornisce la lista dei punti reali, ottenuti in seguito alla fase di eliminazione degli outlier, l'immagine di texture e la mesh associata.

I risultati vengono anche esportati in formato OBJ: questo formato permette la visualizzazione immediata grazie al software MeshLab (vedi sezione 4.3.4).

4.8 Risultati

I risultati ottenuti durante il lavoro di tesi sono soddisfacenti. Sono state eseguite le acquisizioni per l'ispezione di oggetti utilizzando in un primo momento un solo laser. I modelli ottenuti, come si può notare dalle immagini in Appendice D, presentano problemi nelle zone d'ombra per il laser. In tali regioni non vi è alcuna informazione di profondità, quindi il modello 3D crea una superficie errata data dalle facce che collegano i punti perimetrali. Ciò si risolve con l'utilizzo del secondo laser. Sono stati ricostruiti alcuni modelli con l'utilizzo di entrambi i laser, ma risulta necessario eseguirne la registrazione, valutando anche un fattore di scala. Il fatto che non intervengano solo trasformazioni rigide comporta un'analisi approfondita, da considerare tra gli sviluppi futuri.

Capitolo 5

Controllo qualità in 3D: Algoritmi per la Completeness Inspection

5.1 Introduzione

La produzione industriale, negli ultimi decenni, ha vissuto un grande sviluppo dovuto all'introduzione di macchinari in sostituzione del lavoro manuale. Questo passaggio ha permesso un notevole incremento della velocità e della capacità di produzione, e una notevole riduzione dei costi. Per contro, però, la rimozione dell'intervento umano ha portato sicuramente uno svantaggio: l'operatore umano infatti è in grado di accorgersi se un prodotto è affetto da problemi o rotture e ha la capacità di segnalarlo. Il controllo di qualità nasce per colmare questa lacuna. Si tratta di sistemi, il più delle volte informatici, che analizzano le caratteristiche dei prodotti attraverso sonde e sensori per individuarne i problemi. In molti casi, però, non è semplice istruire il sistema informatico sui parametri che distinguono un pezzo corretto da uno difettoso. In ogni caso, maggiore è la potenza di calcolo del sistema e soprattutto maggiori sono le informazioni a disposizione dei sistemi di controllo qualità, maggiore sarà la loro capacità di identificare i difetti di fabbricazione.

La terza dimensione, nell'ambito del controllo visivo di qualità, è stata introdotta solo recentemente. Non vi è dunque molta documentazione in merito, ma certamente questo aspetto può aprire nuovi orizzonti per perfezionare e migliorare i sistemi attuali.

Anche il sistema di visione sviluppato all'interno del progetto 3DComplete fornisce un modello incompleto dell'oggetto ispezionato. La tecnologia Extended 2.5D con una sola acquisizione non consente, infatti, la rilevazione della texture delle componenti verticali dell'oggetto, ovvero delle superfici ortogonali al piano immagine. Le misure di profondità rilevate, inoltre, sono relative esclusivamente alle superfici superiori dell'oggetto.

Le informazioni a disposizione, anche se non descrivono un modello 3D completo, consentono ciononostante lo sviluppo e l'applicazione di molte metodologie di con-

trollo qualità innovative e robuste. Se l'applicazione consente invece l'acquisizione di uno stesso oggetto da più punti di vista, è possibile ricostruire un modello più completo. Questo caso non viene considerato nel progetto 3DComplete perché, a causa del funzionamento dei processi di produzione, il tempo a disposizione non è sufficiente per eseguire più acquisizioni e una tal soluzione risulterebbe troppo costosa. Inoltre, le informazioni aggiunte, in molti casi, non porterebbero vantaggi nell'identificazione della maggior parte dei difetti.

Nel caso particolare in cui sia necessario controllare la correttezza di più parti di un oggetto, non visibili da uno stesso punto di vista, si può pensare di ricorrere all'utilizzo di due sistemi di visione che lavorano in parallelo.

Nella prima parte di questo capitolo verrà illustrato il principio di funzionamento degli algoritmi per il controllo di qualità da un punto di vista generale. In seguito verranno presi in considerazione alcuni difetti dei test case e verrà proposta una soluzione. I casi presi in considerazione sono relativi a difetti presenti in schede elettroniche. Le aziende che hanno fornito le schede difettose sono interessate agli sviluppi del sistema di visione e sono in contatto con l'Università di Padova e IT+Robotics.

Nell'ultima parte del capitolo viene fornita un'idea di come i modelli ottenuti possano essere impiegati per eseguire un controllo di qualità sulle saldature di componenti PTH di schede elettroniche. Campo, questo, in cui il controllo di qualità è molto richiesto e risulta indispensabile.

5.2 Metodologie

Ai sistemi per il controllo di qualità si richiede la capacità di svolgere molteplici compiti. Generalmente il controllo da effettuare è sempre lo stesso per una produzione in serie. I prodotti però cambiano e di conseguenza i relativi controlli devono essere adattati al prodotto. È necessaria, dunque, una fase di set up, che consiste nell'impostare il sistema di controllo, ovvero istruirlo su tempi e modalità delle verifiche da eseguire. In questa fase è richiesto generalmente l'intervento umano, e la complessità dipende dalle caratteristiche dell'interfaccia del sistema e dalle ispezioni richieste. Non sempre le piccole e medie aziende dispongono di personale tecnico con conoscenze nell'ambito dei sistemi di qualità. Questo aspetto è molto importante e influisce certamente sul successo e sulla diffusione di un determinato sistema di qualità.

Viste le ipotesi appena fatte, l'idea di base nello sviluppo degli algoritmi di controllo sui modelli 3D ottenuti con la tecnologia definita in 3DComplete consiste nel minimizzare (se non eliminare) le operazioni di configurazione lasciate all'utente finale. Il sistema dovrebbe cioè essere in grado di apprendere autonomamente cosa "è giusto" e cosa "è sbagliato".

L'applicazione del controllo di qualità, come considerato dal mondo dell'industria, consiste nell'assicurarsi che il prodotto sia conforme ai requisiti espressi dal cliente effettuando, prima della consegna tutti i controlli, le prove e le misurazioni necessarie per scartare quei prodotti che non corrispondono alle specifiche.

Questa metodologia può essere implementata solo se:

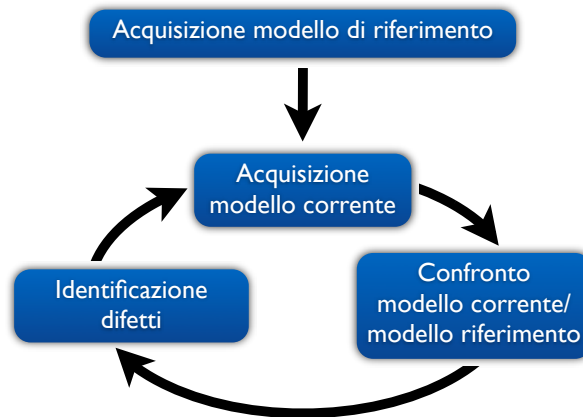


Figura 5.1: Controllo qualità automatico.

1. è ben definito il livello di qualità richiesto attraverso specifiche di prodotto chiare (quali sono le caratteristiche da controllare, le prestazioni attese e le tolleranze ammesse, ecc);
2. sono assicurate tutte le condizioni necessarie per ottenere la qualità;
3. sono stati definiti i punti di controllo, la frequenza dei controlli e cosa controllare;
4. i controlli vengono eseguiti puntualmente;
5. si interviene tempestivamente, se possibile, per riportare la varianza del processo entro le tolleranze ammesse.

In riferimento al progetto 3DComplete, si devono prendere in considerazione tutti questi aspetti, cercando di ridurre il più possibile l'intervento umano.

5.2.1 Controllo qualità automatico

L'obiettivo è quello di rendere il sistema di controllo interamente autonomo. A seconda dell'oggetto ispezionato, esso deve capire se mancano delle parti o se siano difettate. Si tenga presente che, avendo a disposizione un sistema di visione, le possibili ispezioni riguardano la costruzione geometrica, la forma esteriore e tutto ciò che è applicabile alla texture. Non è possibile, ad esempio, verificare il funzionamento elettrico di un integrato montato su scheda PCB, a meno che questo non sia dovuto a problemi visibili dall'aspetto esteriore (come la mancanza dello stagno su un piedino).

Il controllo di qualità può essere automatizzato secondo il seguente procedimento (vedi Figura 5.1):

1. si opera l'acquisizione di un primo campione di un determinato oggetto la cui correttezza è stata verificata manualmente: il sistema elabora il modello 3D e lo memorizza come modello di riferimento per l'ispezione.

2. si opera l'acquisizione di tutti gli altri campioni di cui si vuole verificare automaticamente la correttezza: il sistema si occupa di confrontare ogni modello 3D con quello di riferimento. Da questo confronto individua le differenze e le classifica come difetti.

Il principio è di semplice comprensione, ma comporta un grosso investimento di tempo dal punto di vista progettuale. Sarà necessaria una fase di pre-elaborazione per allineare i due modelli o per estrarne le caratteristiche in comune. In seguito si devono definire le metriche in grado di stabilire il concetto di difetto come risultato del confronto tra modelli.

Vantaggi: non richiede alcuna procedura di impostazione, vengono rilevati i difetti sull'intera superficie acquisita.

Svantaggi: l'elaborazione è onerosa, e le routine per l'individuazione dei difetti richiedono un grosso impegno dal punto di vista progettuale.

5.2.2 Controllo qualità semi-automatico

Il controllo di qualità interamente automatizzato comporta una grande potenza di calcolo necessaria per eseguire il confronto del modello corrente con quello di riferimento. Ogni volta, infatti, viene analizzato l'intero modello, anche se alcune delle sue componenti non saranno mai affette da errori rilevanti.

Per i test case selezionati nel progetto 3DComplete, in particolare, sono richiesti controlli specifici su un numero limitato di parti dell'intero oggetto. Non ha senso richiedere tanta potenza di calcolo e risorse di tempo per verificare solo pochi particolari. Pertanto si è pensato di sviluppare algoritmi ad-hoc, che siano comunque riutilizzabili per l'identificazione di difetti simili previa una veloce e semplice procedura di configurazione.

Tali algoritmi possono essere impiegati per eseguire confronti tra parti di diversi modelli (tra modello di riferimento e un modello acquisito) o, in alternativa, per eseguire confronti tra componenti all'interno di uno stesso modello (tra componenti di una stessa scheda). Nel secondo caso non è richiesta l'acquisizione del modello di riferimento.

5.3 Descrizione funzionale

Gli algoritmi sviluppati sono preposti all'individuazione di alcuni dei difetti catalogati nell'allegato in Appendice A. Si tratta di difetti presenti nelle schede elettroniche. Si vogliono analizzare alcune caratteristiche dei componenti assemblati sul PCB. Il procedimento si compone di tre passi:

1. individuazione delle posizioni dei componenti da ispezionare nel modello: viene effettuata mediante la segmentazione dell'immagine di texture 2D e una valutazione delle dimensioni dei blob ottenuti;

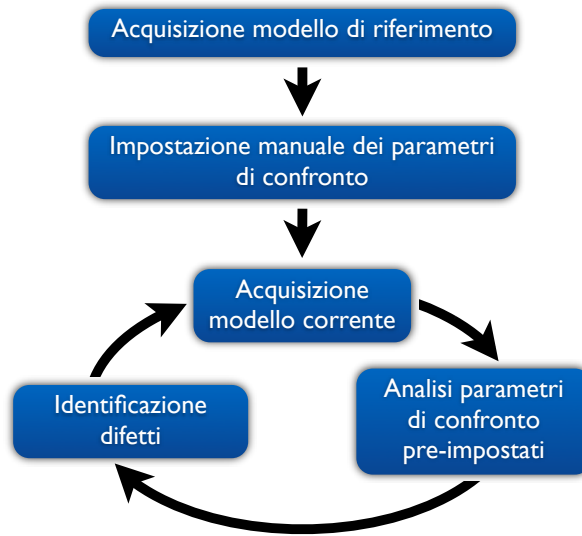


Figura 5.2: Controllo qualità semi-automatico.

2. estrazione delle caratteristiche dei punti costituenti le aree individuate al punto 1;
3. confronto tra le caratteristiche di tutti i componenti calcolate al punto 2 per determinarne i difetti (casi anomali).

5.4 Identificazione delle componenti nell'immagine di texture

Il primo aspetto da sviluppare consiste nell'identificare un determinato componente nell'immagine di texture 2D di una scheda elettronica. Questo processo può avvenire attraverso il riconoscimento di particolari caratteristiche di forma oppure di colore. Chiaramente, se un difetto di un dispositivo ne causa variazioni nella forma, non è più possibile la sua identificazione mediante i dati 3D; sarà comunque possibile identificarlo nell'immagine di texture. I difetti finora presentati (vedi cataloghi in Appendice) sono relativi a componenti elettronici costruttivamente simili tra loro, ma facilmente identificabili secondo le proprie caratteristiche di colore.

Si è scelto allora di identificare i componenti tramite l'immagine di texture 2D: il procedimento risulta inoltre più semplice e preciso rispetto al caso 3D. È possibile distinguere ogni componente sia valutandone i codici (non sempre leggibili nell'immagine), sia tramite il colore e i parametri geometrici della faccia superiore.

5.4.1 Funzione per la ricerca di componenti elettronici

Obiettivo di questo metodo è individuare nell'immagine 2D di texture, ottenuta dall'elaborazione del modello, tutti i componenti che rispecchiano determinate caratteristiche di forma e di colore.

I parametri di ricerca sono di seguito elencati dettagliatamente:

Valori RGB minimi: valori dei canali rosso, verde e blu minimi che può assumere il componente cercato;

Valori RGB massimi: valori dei canali rosso, verde e blu massimi che può assumere il componente cercato;

Range di proporzionalità del blob: range in cui il rapporto di due lati consecutivi del più piccolo rettangolo contenente il componente viene considerato valido;

Range di area: range entro il quale il valore di area del più piccolo rettangolo contenente il componente viene considerato valido;

Range rapporto area identificata/area totale: range in cui il rapporto tra l'area della superficie colorata identificata e l'area del più piccolo rettangolo contenente il componente viene considerato valido.

Il funzionamento logico è il seguente:

1. Creazione di una immagine binaria, con la stessa dimensione dell'immagine di texture, nella quale vengono evidenziati i pixel i cui punti corrispondenti nell'immagine originale rispettano i valori minimi e massimi per le componenti RGB (rosso, verde e blu). È questo il passo principale di segmentazione;
2. Correzione dell'immagine binaria mediante filtri che possono essere combinati e applicati un numero prescelto di volte, a seconda dell'applicazione. I filtri sono i seguenti:
 - (a) Rimozione dei falsi positivi tramite un processo di erosione dei pixel evidenziati: per ogni pixel evidenziato, se i 4 vicini (sotto, sopra, destra e sinistra) non sono tutti evidenziati, allora il pixel viene escluso dai risultati.
 - (b) Rimozione dei falsi negativi tramite un processo di dilatazione dei pixel evidenziati: per ogni pixel non considerato, se almeno uno dei quattro vicini è evidenziato, allora il pixel viene incluso tra i risultati.
3. Raggruppamento dei pixel evidenziati, tra loro adiacenti, per formare blob rappresentanti i componenti della scheda. Questo passo consiste nell'etichettare le componenti connesse dell'immagine binaria. Un pixel evidenziato viene considerato connesso se negli 8 pixel adiacenti vi è almeno un altro pixel validato. In alternativa la ricerca può avvenire solo sui 4 pixel più vicini (vengono esclusi i pixel sulle diagonali);
4. Per ogni blob, vengono poi calcolate tutte le caratteristiche di interesse quali area, dimensioni esterne, posizione nell'immagine, centroide, perimetro, punto medio;
5. Per ogni blob, vengono verificate le condizioni sui tre valori di range (sulla forma del blob e le aree): in tal caso vengono salvati i dati tra i risultati, altrimenti vengono eliminate le relative informazioni.

Al termine dei cinque passi si otterrà la lista dei soli componenti corrispondenti alle specifiche date. Di ogni componente si conosce così la posizione relativa nell'immagine, la dimensione e la forma della superficie individuata (mappa di verità corrispondente ai valori RGB indicati).

Da questi dati è poi possibile estrarre l'insieme di punti 3D dalla mesh rappresentante il modello in quanto vi è una corrispondenza biunivoca con i pixel dell'immagine.

La funzione di ricerca dei componenti, così come è stata sviluppata, presenta certamente buone prestazioni in confronto all'utilizzo di tecniche di pattern matching. Per contro, non è garantito alcun risultato nella ricerca e possono essere individuati esclusivamente componenti con determinate caratteristiche di colore. Tale tecnica, inoltre, permette il funzionamento anche in presenza di piccole variazioni di luce. È sufficiente infatti rendere meno restrittivi i vincoli sul colore.

5.5 Controllo presenza/assenza dei componenti su PCB

Uno dei controlli di completezza più richiesti nella produzione di schede elettroniche, è il controllo di presenza di tutti i componenti nella scheda assemblata. Tale problema è già stato ampiamente risolto in ambito 2D, con sistemi di visione limitati a due dimensioni. Se un codice seriale o un codice a barre non viene trovato nella texture di una scheda, o se non viene trovato alcun blob con le caratteristiche che descrivono un componente, allora si può assumere che questo non sia presente.

Il controllo di presenza/assenza è conseguenza diretta della ricerca dei componenti in una data scheda.

5.5.1 Applicazione su scheda Cobra At

In riferimento al catalogo dei difetti in Allegato A, vediamo come è stato possibile verificare la presenza della guaina gialla nella scheda fornita da Cobra At (vedi difetto 5 a pagina 10 del catalogo).

È stato sufficiente eseguire la ricerca della guaina impostando i seguenti parametri per la funzione di ricerca:

Parametro	Valore
Rosso (R)	[70, 150]
Verde (G)	[50, 130]
Blu (B)	[30, 90]
Area blob	[5000, 20000]
Rapporto dimensioni blob massimo	100
Rapporto (Area blob/Area identificata) massimo	10
Num. iterazioni filtro rimozione Falsi Positivi	1
Num. iterazioni filtro rimozione Falsi Negativi	0

In Figura 5.3 vengono illustrati i risultati intermedi dei passi di ricerca della guaina e in Figura 5.4 viene riportato il risultato finale.



Figura 5.3: Controllo presenza guaina su scheda Cobra At: segmentazione dell'immagine (a sinistra), applicazione dei filtri di correzione (al centro), selezione blob validi (a destra).

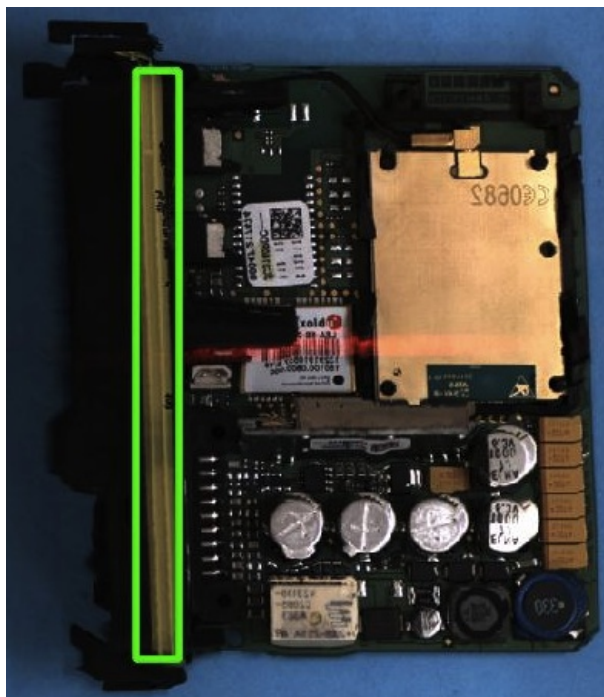


Figura 5.4: Esito controllo presenza guaina gialla su scheda Cobra At.

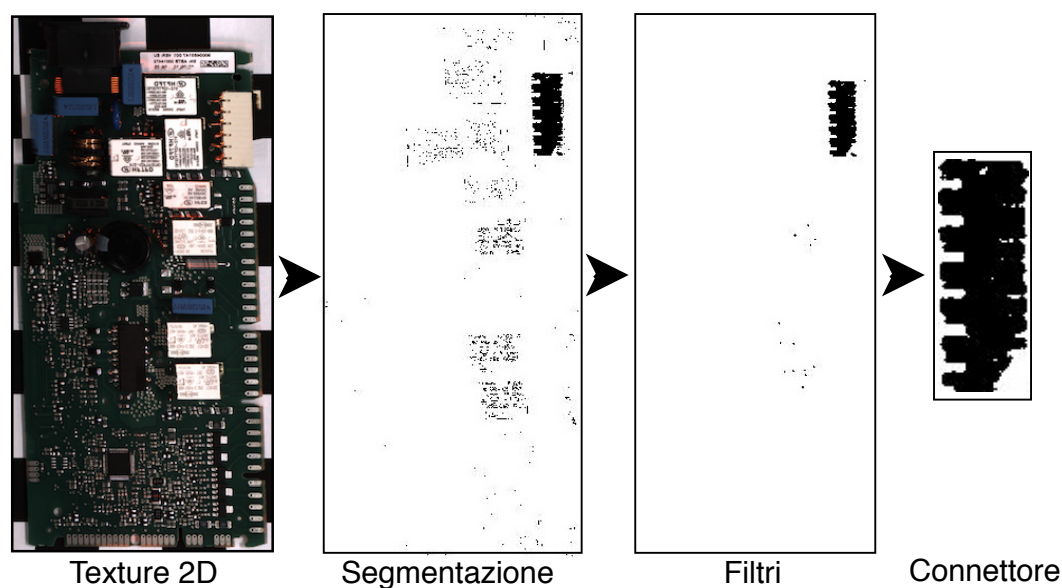


Figura 5.5: Esito ricerca connettore su scheda Selcom.

5.5.2 Applicazione su scheda Selcom

La ditta Selcom riscontra spesso problemi nel montaggio di un connettore (vedi difetto 1 a pagina 1 del catalogo in Appendice A). Per poter eseguire la verifica, di cui si parlerà nella sezione successiva, è necessario prima individuare tale componente sulla scheda: in Figura 5.5 viene riportato il risultato della ricerca applicato a tale caso.

5.6 Controllo inclinazione componenti PTH

Un controllo richiesto dalle ditte Cobra At, Selcom e Ardoran consiste nel verificare la giusta inclinazione di alcuni componenti assemblati. Ciò è possibile grazie alle informazioni aggiunte dai dati 3D.

Si suppone che la maggior parte della superficie superiore di ogni componente di interesse sia piatta, ovvero costituisca un piano 3D.

Tale problema non è risolvibile con tecnologie 2D in quanto in un'immagine superficiale due componenti uguali con diversa inclinazione appaiono allo stesso modo.

L'algoritmo sviluppato è costituito dai seguenti passi:

1. Estrazione delle informazioni 3D dei componenti di interesse: viene eseguita mediante la funzione di ricerca illustrata nella Sezione 5.5;
2. Per ogni componente viene calcolato il piano che meglio approssima la superficie costituita dai punti 3D;
3. Calcolo dell'inclinazione reciproca tra i piani stimati di ogni componente;

4. Confronto tra le inclinazioni di tutti i componenti per individuare quelli con errata inclinazione. Vengono distribuiti i valori su un istogramma: il bin con maggiori voti indicherà l'inclinazione corretta e verrà preso come riferimento, i componenti negli altri bin saranno considerati errati se troppo distanti dal bin di riferimento.

Nel seguito analizziamo i punti 2 e 3, che richiedono maggiore interesse.

5.6.1 Stima del piano passante per una nuvola di punti

L'obiettivo è stimare i valori dei coefficienti che definiscono la funzione di un piano 3D, del tipo $ax + by + cz + d = 0$.

Supponiamo dunque di disporre dell'insieme di punti della superficie di un componente. È probabile che alcuni di questi punti non siano corretti e possono quindi introdurre errori nella stima del piano. Prima di calcolare i coefficienti, è quindi necessario selezionare i punti più probabili, ovvero quelli più allineati, ed escludere quelli troppo lontani dagli altri. Questa pulizia avviene già in gran parte nelle due fasi di eliminazione degli outlier (sul profilo e sul modello 3D), ma in quest'ambito, si vogliono escludere anche piccole discontinuità delle superfici superiori dei componenti (ad esempio piccole concavità dovute alla costruzione del case o punti non validi in prossimità dei bordi).

Il metodo si compone dunque di due passi fondamentali:

1. Selezione del maggior numero di punti allineati (equivale a considerare la superficie con area maggiore): viene eseguita mediante l'utilizzo di RANSAC¹. Tale algoritmo fornisce un metodo iterativo per la stima dei parametri di un modello matematico a partire da un insieme di dati contenente outlier. In questo passo non viene considerato il modello matematico risultante, ma l'insieme dei punti che ha validato tale modello (vedi esempio in Figura 5.6);
2. Sui punti selezionati, utilizzo del metodo dei minimi quadrati² per stimare i coefficienti del piano che si avvicini il più possibile ad un'interpolazione dei punti 3D. Si tratta di una tecnica di ottimizzazione che permette di trovare una funzione che minimizza la somma dei quadrati delle distanze dai punti dati.

Nello sviluppo del programma sono state utilizzate le librerie distribuite dal Prof. Peter Kovesi [26] per l'implementazione dei metodi RANSAC e minimi quadrati.

5.6.2 Calcolo dell'inclinazione reciproca tra 2 piani

Date le equazioni di due piani 3D, del tipo:

$$ax + by + cz + d = 0$$

¹RANSAC sta per "RANdom SAmple Consensus". L'algoritmo è stato pubblicato per la prima volta da Fischler e Bolles nel 1981.

²In inglese OLS: Ordinary Least Squares.

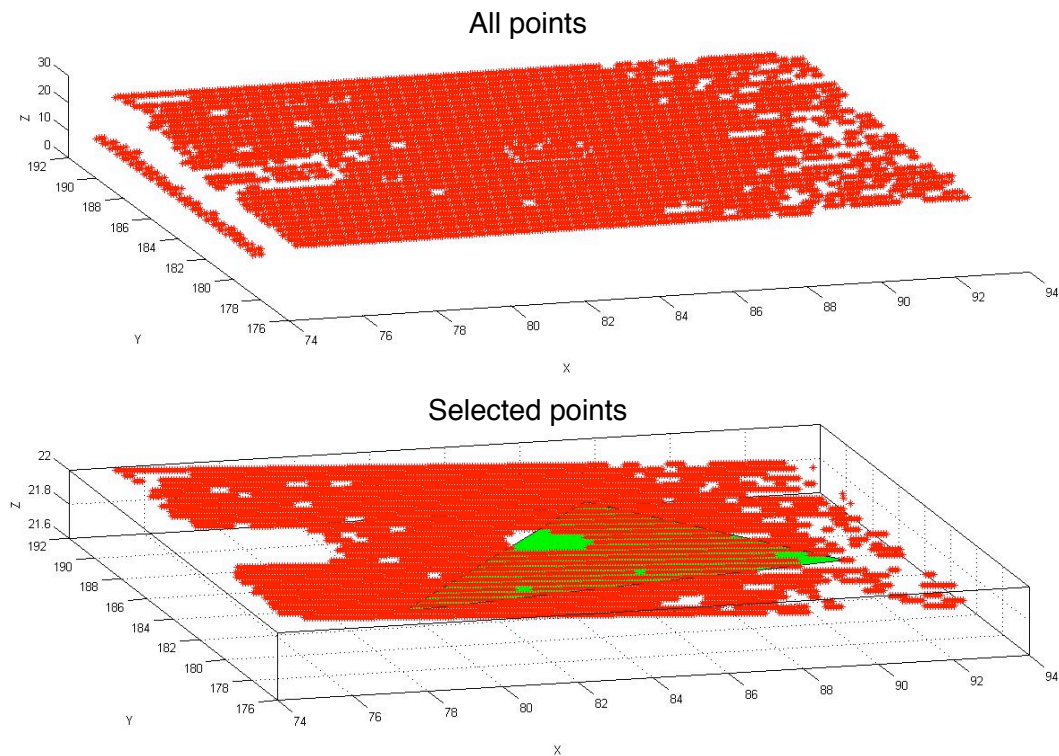


Figura 5.6: Nuvola di tutti i punti 3D appartenenti alla superficie di un componente (sopra) e punti selezionati mediante RANSAC per la stima del piano (sotto). Il triangolo verde è costruito sui 3 punti che hanno ottenuto maggiore supporto con RANSAC.

L'obiettivo consiste nel calcolare l'angolo minimo che porta uno dei due piani ad essere parallelo al secondo.

Per semplicità, il problema può essere riformulato nel calcolare l'angolo che intercorre tra i due vettori normali ai piani. Tali vettori sono rappresentati dalle triple $[abc]$. L'angolo è presto calcolato impiegando la formula inversa del prodotto scalare, ovvero:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{N_1 \bullet N_2^T}{|N_1| \cdot |N_2|}\right)$$

dove N_1 e N_2 rappresentano i vettori normali ai due piani.

5.6.3 Applicazione su scheda Selcom

Si riportano, in questa sezione, i risultati sul controllo dell'inclinazione del connettore esterno bianco della scheda Selcom (vedi difetto 1 a pagina 1 del catalogo in Appendice A).

Il controllo ha avuto esito positivo ed è stato possibile distinguere una scheda senza difetti da una con connettore montato erroneamente. In Figura 5.7 è riportato

l'esito del controllo su una scheda con connettore correttamente assemblato, mentre in Figura 5.8 è riportato l'esito del controllo per una scheda difettosa.

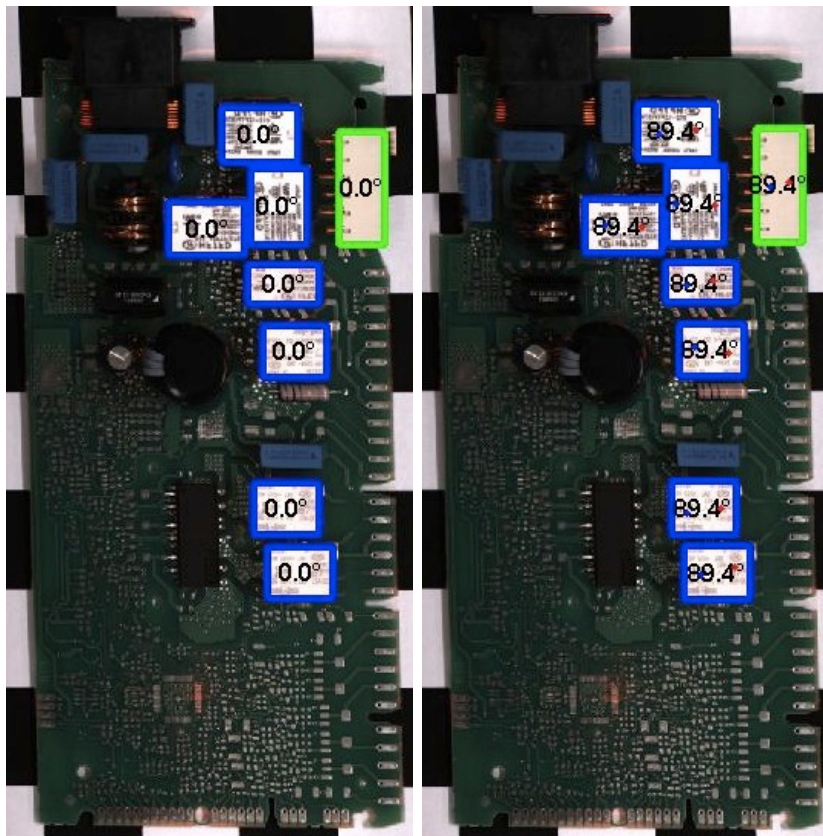


Figura 5.7: Controllo dell'inclinazione del connettore su scheda Selcom *corretta*: calcolo della inclinazione delle superfici rispetto al connettore esterno (sinistra) e rispetto al vettore normale al piano xy (destra).

5.6.4 Applicazione su scheda Cobra At

Cobra At, in riferimento alla scheda fornita come test case, non prevede attualmente un sistema di controllo della completezza. Molto spesso, i pezzi risultano però difettosi a causa di un modulo GSM difficile da installare correttamente. Non sempre ciò pregiudica il funzionamento. È possibile che la scheda funzioni correttamente, ma che la sua affidabilità nel tempo non sia garantita.

Il difetto consiste nell'errato inserimento del modulo nell'apposito alloggiamento montato sulla scheda, che risulta in una inclinazione non coerente con la scheda stessa (vedi difetto 3 a pagina 10 del catalogo in Appendice A).

Su tale scheda è stato allora applicato il controllo dell'inclinazione: viene confrontata la superficie del modulo (piana) con quella dell'etichetta di serie (incollata direttamente sulla scheda) e di un componente con case rettangolare.

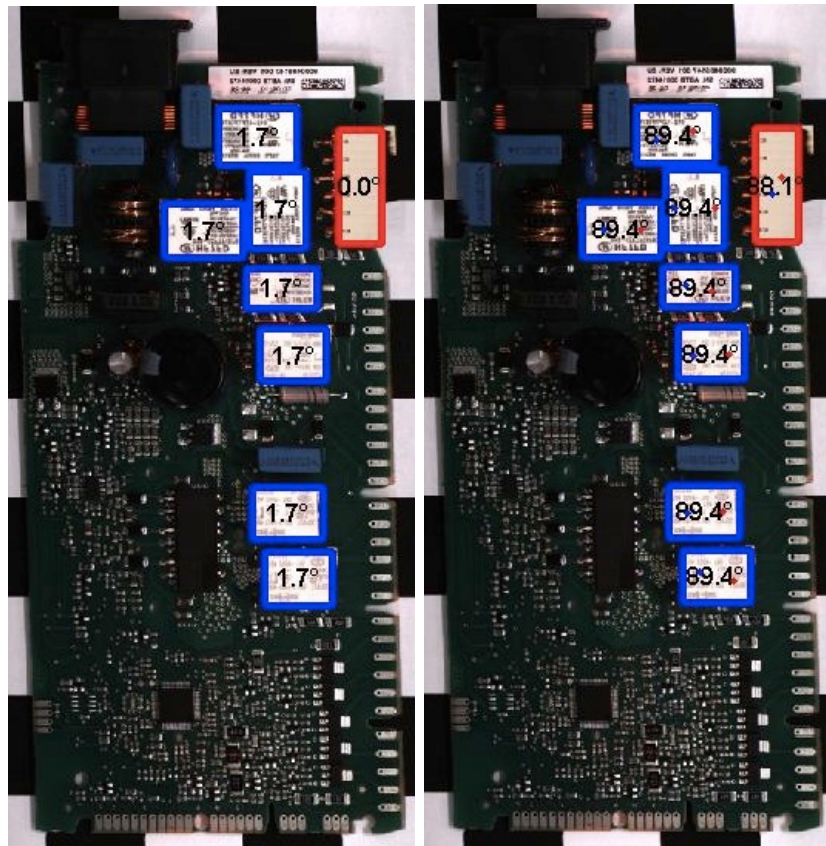


Figura 5.8: Controllo dell'inclinazione del connettore su scheda Selcom *difettosa*: calcolo della inclinazione delle superfici rispetto al connettore esterno (sinistra) e rispetto al vettore normale al piano xy (destra).

In Figura 5.9 è riportato l'esito del controllo su una scheda correttamente assemblata; in Figura 5.10 si nota invece come venga identificato il difetto di assemblaggio.



Figura 5.9: Controllo dell'inclinazione del modulo GSM su scheda Cobra At *corretta*.

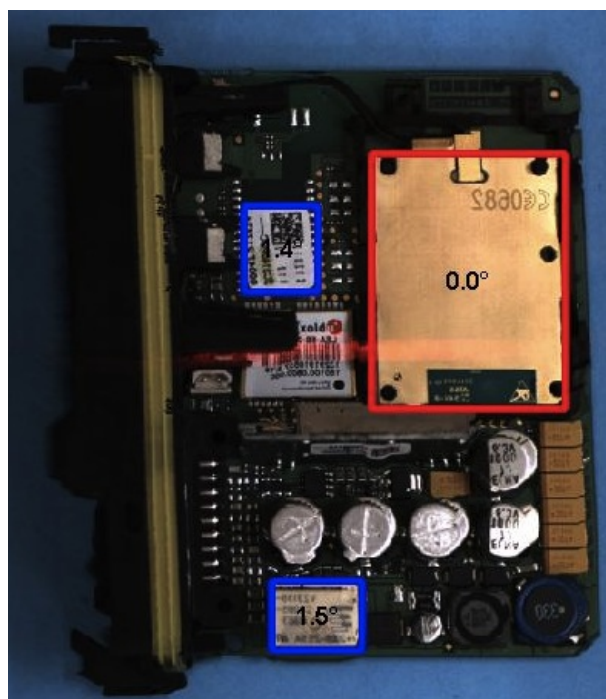


Figura 5.10: Controllo dell'inclinazione del modulo GSM su scheda Cobra At *difettosa*.

5.7 3D Edge detection

Molte applicazioni nel controllo di qualità richiedono l'identificazione di alcune parti di un oggetto per verificarne l'interezza o il corretto montaggio. In 2D non è sempre possibile risolvere efficacemente questa funzione in quanto può accadere che la componente che si vuole identificare abbia lo stesso colore dello sfondo o sia assemblata insieme ad altri pezzi dello stesso colore. Nell'immagine, dunque, risulta impossibile distinguere i due pezzi. Questo problema trova soluzione in 3D, dove è possibile sfruttare le informazioni di profondità per distinguere le diverse componenti dell'oggetto ispezionato.

La procedura per la detection dei bordi in 3D consiste nei seguenti passi:

1. Creazione immagine Range, se non disponibile: è un'immagine in scala di grigi in cui i colori bianco e nero rappresentano le componenti a massima e minima altezza, mentre le restanti parti sono mappate in scala di grigio, la cui intensità è proporzionale all'altezza, nei limiti dei due estremi;
2. Correzione delle zone d'ombra — aree dell'immagine in cui i dati 3D non sono corretti o sono assenti — nei modelli ottenuti con un laser;
3. Applicazione dell'algoritmo di Canny³ per l'edge detection sull'immagine Range;
4. Applicazione dell'algoritmo di Canny sull'immagine di texture 2D: vengono estratti anche i contorni dovuti a sigle, codici a barre, variazioni di colori e parti prive di informazioni 3D quali etichette;
5. Eventuale fusione dei risultati ottenuti ai punti 2 e 3.

5.7.1 Correzione delle zone d'ombra

È possibile correggere le zone d'ombra formatesi nei modelli costruiti mediante un solo laser conoscendo i parametri estrinseci del sistema e la direzione di avanzamento. Si può affermare che il primo lato di ogni zona d'ombra incontrato lungo il verso di scansione (passaggio da una faccia del modello ad una zona d'ombra) costituirà un bordo, mentre il secondo lato (passaggio da una zona d'ombra ad una faccia del modello) non fornisce alcuna informazione. La correzione può avvenire percorrendo l'immagine nei due versi tangenziali rispetto alla direzione di acquisizione ed estendendo i colori dei pixel in prossimità delle zone d'ombra fino a riempirle. Questo è possibile se i valori di colore di due punti rispettivamente estremi destro e sinistro della zona d'ombra hanno lo stesso valore. In caso contrario la correzione non può essere eseguita o eventualmente si deve scegliere di espandere solo un colore (ad esempio quello che indica una superficie più bassa).

Per mancanza di tempo durante il lavoro di tesi non è stato possibile sviluppare l'algoritmo che svolge questa funzione, ma in Figura 5.11 se ne illustra il funzionamento.

³Algoritmo ideato nel 1986 da John F. Canny.

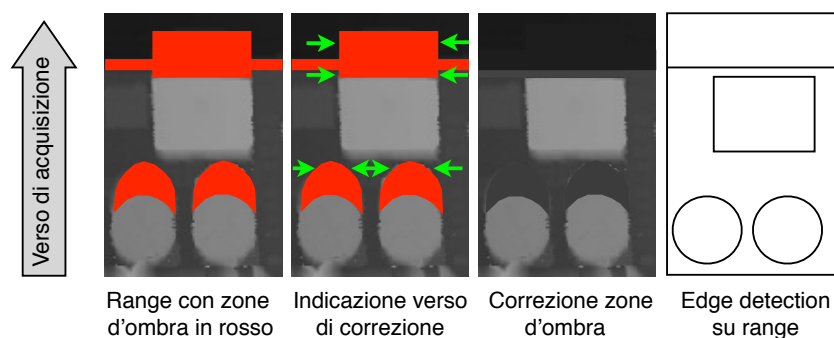


Figura 5.11: Correzione delle zone d'ombra per 3D Edge detection.

5.7.2 Test su scheda Cobra At

L'efficacia della funzione 3D edge detection è stata verificata eseguendo un test su una scheda elettronica fornita da Cobra At. In Figura 5.12 vengono presentati i risultati ottenuti. Come è possibile osservare dalla figura, l'edge detection applicata all'immagine Range porta molti vantaggi: è semplice individuare i diversi componenti montati sulla scheda e verificarne l'integrità dei bordi. Si noti come viene correttamente definito il connettore nero (montato all'estremità destra della scheda) con la rilevazione dei contorni a partire dall'immagine Range. Nella texture questo non è possibile perché il componente si confonde esternamente con i quadrati neri della scacchiera e la parte interna (la parte fissata alla scheda) risulta in ombra.

5.8 Configurazione dei controlli: interfaccia utente

Un sistema per il controllo qualità deve essere valutato per le sue capacità nell'identificazione di difetti, ma anche per la sua semplicità di utilizzo. L'utente, sia esso un esperto nelle tecnologie impiegate per il controllo qualità oppure no, dovrà comunque avere la possibilità di configurare con il minimo sforzo un determinato ciclo di controllo. L'interfaccia utente gioca un ruolo chiave sotto questo punto di vista.

Per quanto riguarda il sistema di visione oggetto del lavoro di tesi, lo studio e la progettazione dell'interfaccia grafica definitiva non è in programma nel breve termine. Si procederà con questa fase non prima di aver implementato tutte le funzioni necessarie per il controllo qualità di cui l'interfaccia ne permetterà poi la gestione.

5.8.1 Il software *3DC ParamSet*

Con il presente lavoro di tesi, si è ugualmente voluto fornire uno strumento per la configurazione dei parametri necessari alla funzione di ricerca e localizzazione dei componenti su schede elettroniche. Il programma realizzato, chiamato *3DC ParamSet*, permette l'estrazione dei dati utili alla funzione di ricerca semplicemente selezionando l'area dell'immagine di texture occupata dal componente in oggetto.

L'utilizzo avviene esclusivamente attraverso il puntatore del mouse in modo semplice e intuitivo. Automaticamente il programma valuterà le caratteristiche della zona evidenziata e formulerà i dati necessari per la ricerca (range di validità per i valori RGB, dimensione del bounding box del componente e area).

In Figura 5.13 viene illustrata l'interfaccia grafica del programma. L'utilizzo risulta veramente immediato: è sufficiente aprire l'immagine 2D di interesse, selezionare l'area occupata dal componente cercato e salvare i risultati ottenuti tramite l'apposito pulsante. Analizziamo ora il funzionamento interno del programma, suddividendone le funzioni in base ai valori forniti:

RGB: i valori massimo e minimo per ogni canale vengono calcolati distribuendo ogni pixel su tre istogrammi in base al loro valore di rosso, verde e blu (ogni grafico sarà composta da 256 bin). Gli istogrammi così costruiti rappresentano generalmente una funzione simile al una gaussiana, o sono eventualmente formati da più picchi. Per ottenere i singoli range di validità viene considerato un intorno consistente del valore massimo.

Box area: i valori di area minima e massima per il bounding box contenente il componente vengono scelti togliendo e aggiungendo il 20% all'area della zona selezionata.

Ratio area: tale parametro viene calcolato mettendo in relazione l'area del bounding box con il numero di pixel corrispondenti ai valori RGB calcolati e viene poi introdotto un lasco di validità maggiore.

Aspect: calcolato come rapporto tra il lato maggiore e quello minore dell'area selezionata e maggiorato del 25%.

La tecnica adottata funziona correttamente ai fini dell'individuazione dei parametri di ricerca per i componenti difettosi classificati nei cataloghi. Il risultato non è certamente garantito in casi più generali, dove i colori del componente si confondono con lo sfondo o sono presenti troppi colori con caratteristiche fortemente differenti. Nel primo caso è conveniente eseguire la ricerca analizzando la forma del componente (se questa fornisce informazioni particolari che ne permettono l'individuazione), mentre il secondo caso è risolvibile nell'ambito 2D adottando tecniche di pattern matching o equivalenti.

Una buona idea consiste nel progettare una tecnica di ricerca combinata 2D - 3D per ottenere i vantaggi derivanti da entrambi i domini.

5.9 Controllo saldature componenti PTH

In questa sezione si vuole proporre un metodo per l'ispezione delle saldature applicabile ai risultati ottenuti col sistema di acquisizione sviluppato. Controlli di questo tipo sono molto richiesti dalle aziende che si occupano di produzione di schede elettroniche e in Italia questo settore è molto sviluppato. Interessante anche il fatto che

il costo del sistema è alla portata di piccole e medie aziende, le quali non hanno la possibilità di acquistare apparecchiature ad hoc.

Il metodo proposto prende ispirazione dall'approccio sviluppato in [25], denominato "A Tiered-Color Illumination Approach". Nel seguito verrà prima riportata una breve classificazione dei difetti delle saldature per l'ambito di interesse, in seguito viene illustrato brevemente il metodo di ispezione da cui viene presa ispirazione e viene spiegato come questo può essere adattato ai dati ottenuti con gli strumenti definiti per il progetto 3DComplete.

5.9.1 Classificazione dei difetti più comuni nelle saldature

In tabella 5.1 viene riportata una classificazione dei difetti, dandone una breve descrizione e indicando attraverso quali caratteristiche essi possono essere identificati con metodi di ispezione visiva.

Defect	Description	Visible changes in solder fillet
No solder	Solder not joining lead and pad	No fillet
Insufficient	Insufficient solder for mechanical bond	Segments of fillet missing
Excess	Too much solder at joint	Convex fillet
Cold joint	Joint not sufficiently heated	Dull fillet surface
Disturbed joint	Joint moved during solidification	Dull fillet surface
Dewetted pad	Poor bond to solder pad	No profile
Dewetted lead	Poor bond to component lead	Improper fillet profile
Blow holes	Air hole in fillet	Indentations in fillet
Missing lead	Lead not properly inserted	No fillet (hole)

Tabella 5.1: Classificazione difetti saldature.

5.9.2 Approccio "Tiered-Color Illumination"

Il sistema hardware

Il sistema, lato hardware, si compone principalmente di una videocamera abbinata a due fonti luminose ad anello: una di colore blu (high angle) posta ad una certa altezza rispetto al PCB da ispezionare e una di colore rosso (low angle) posta in prossimità del PCB ed entrambe concentriche con l'asse della videocamera. In Figura 5.14 è illustrata la configurazione del sistema.

In questo modo, i differenti angoli di incidenza delle due sorgenti luminose col il PCB fanno in modo che venga riflesso nell'area vista della camera un determinato colore in base alla pendenza degli oggetti presenti sulla superficie del PCB.

In Figura 5.15 viene riportato il risultato ideale dell'acquisizione di una saldatura priva di difetti. Si noti come nell'immagine acquisita dalla videocamera la piazzola risulti colorata dalla luce blu e la saldatura colorata con sfumature della luce rossa.

Identificazione dei difetti

L'identificazione dei difetti avviene tramite l'analisi delle possibili combinazioni dei colori rosso e blu, ottenute in prossimità delle saldature dei reofori. La Figura 5.16 illustra i casi considerati.

Le immagini risultanti vengono poi segmentate ed elaborate per identificare se vi sia un difetto, e in tal caso lo classifica (per maggiori informazioni vedere [25]).

Nell'approccio descritto in [25] vengono calcolati alcuni parametri (area della regione blu e rossa, perimetro delle due regioni, ecc) e poi viene impiegata una funzione di distribuzione della probabilità (PDF probability density function) per ogni parametro, calcolata su un campione di 100 saldature corrette e 100 saldature difettose. Questa funzione fornisce il valore di soglia che indica la presenza di un difetto.

I dati ottenuti con lo scanner 3D ci forniscono inoltre molte informazioni aggiuntive, come ad esempio la concavità delle saldature (valutazione della derivata seconda).

5.9.3 Utilizzo della tecnica Tiered-Color Illumination nel progetto 3DComplete

La tecnica di identificazione dei difetti sopra riportata può essere applicata ai risultati ottenuti nel progetto 3DComplete. Per far ciò, è necessaria una fase di pre-elaborazione che, a partire dai modelli 3D, fornisca immagini tipo quelle ottenute con i due illuminatori e la videocamera 2D, con l'approccio Tiered-Color Illumination. A tal fine, nel prossimo paragrafo, viene proposta un'idea per l'adattamento dei dati.

Procedura di pre-elaborazione dei dati

A partire dall'immagine di texture di una scheda elettronica e dalla nuvola di punti ottenute col sistema sviluppato, è possibile attuare i seguenti passi:

1. Nell'immagine 2D identificare le saldature dei reofori (se non se ne conoscono già le coordinate) ed estrarre l'area circostante con allegate le misure di profondità della zona;
2. Per ogni saldatura identificata:
 - Creare una nuova immagine "segmentandola" in base alla pendenza (quindi alla derivata locale) delle misure di profondità ottenute con lo scanner 3D per ricreare le zone blu e rosse.

A questo punto si dispone, per ogni saldatura, di un'immagine locale simile a quella ottenuta con la tecnica Tiered-Color Illumination. E' possibile, quindi, riutilizzare la stessa procedura di elaborazione alle immagini così ottenute per identificare i difetti delle saldature.

Problematiche

Per poter utilizzare il metodo sopra illustrato è necessario verificare che non esista un brevetto, o vi sia la possibilità di acquistarne la licenza d'uso, nel caso questa risulti conveniente.

Un altro problema da risolvere, emerso durante alcuni test di fattibilità eseguiti in laboratorio, è la risoluzione ottenuta nei dati 3D. Il profilo delle saldature, infatti, è spesso affetto da problemi dovuti a riflessi della luce laser sullo stagno della saldatura.

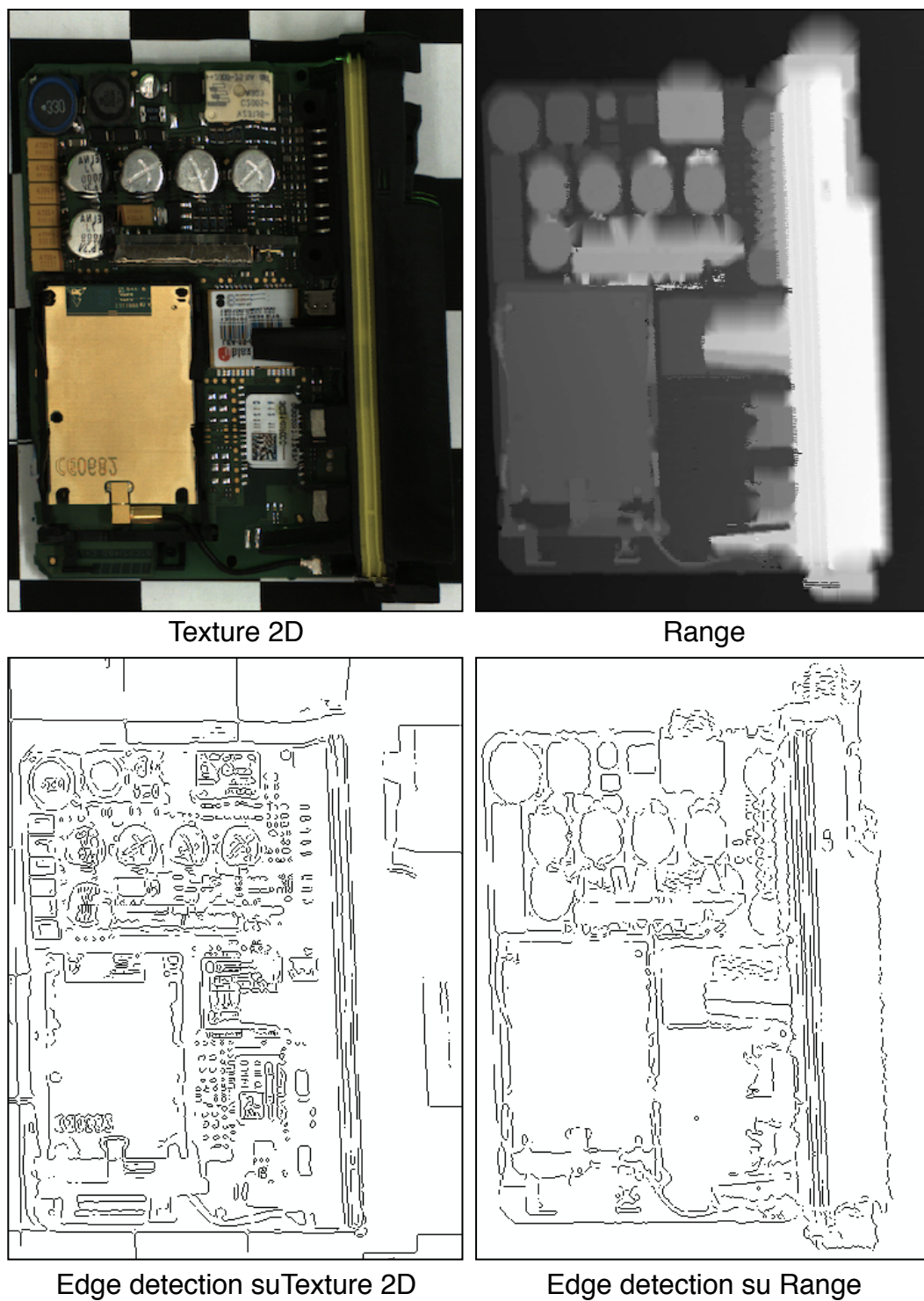
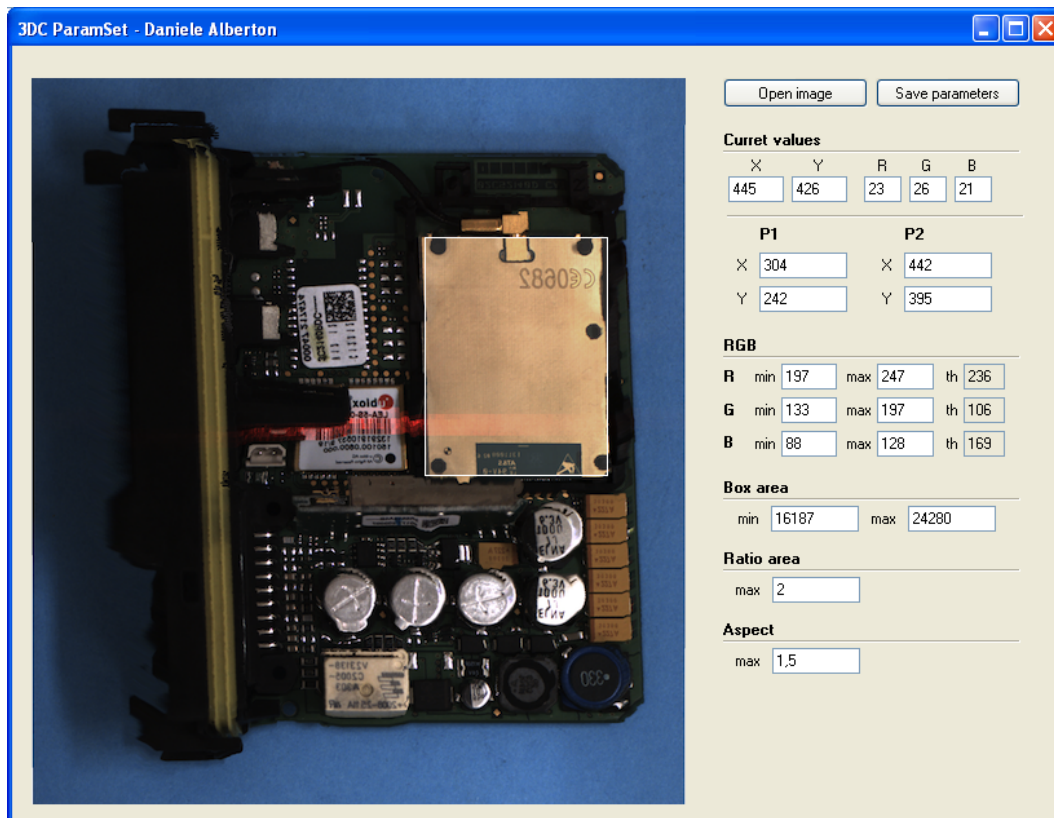


Figura 5.12: 3D Edge detection: test su scheda fornita da Cobra At senza correzione delle zone d'ombra.

Figura 5.13: Schermata del programma *3DC ParamSet*.

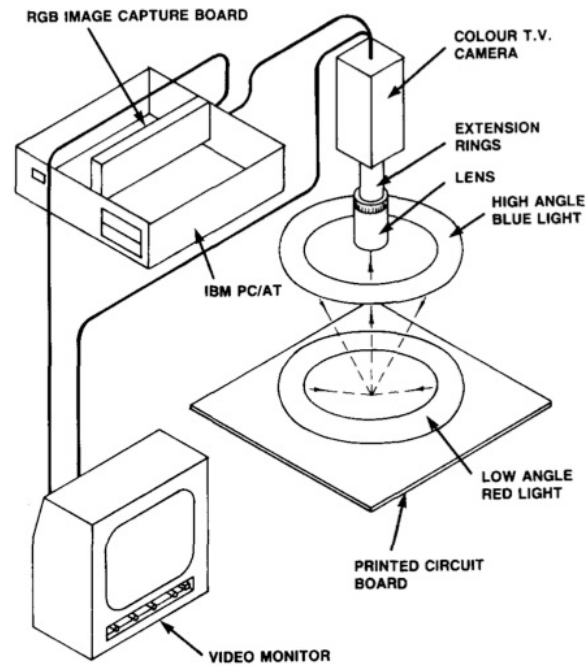


Figura 5.14: Configurazione sistema Tiered-Color Illumination.

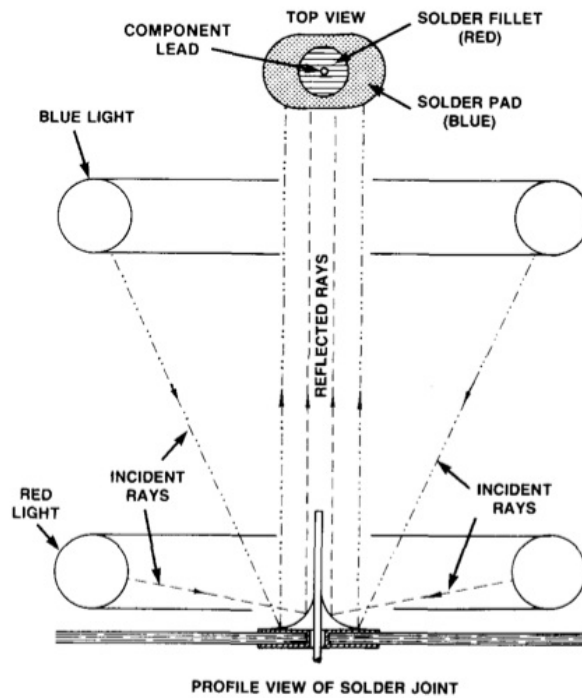


Figura 5.15: Acquisizione di una saldatura priva di difetti con l'approccio Tiered-Color Illumination.

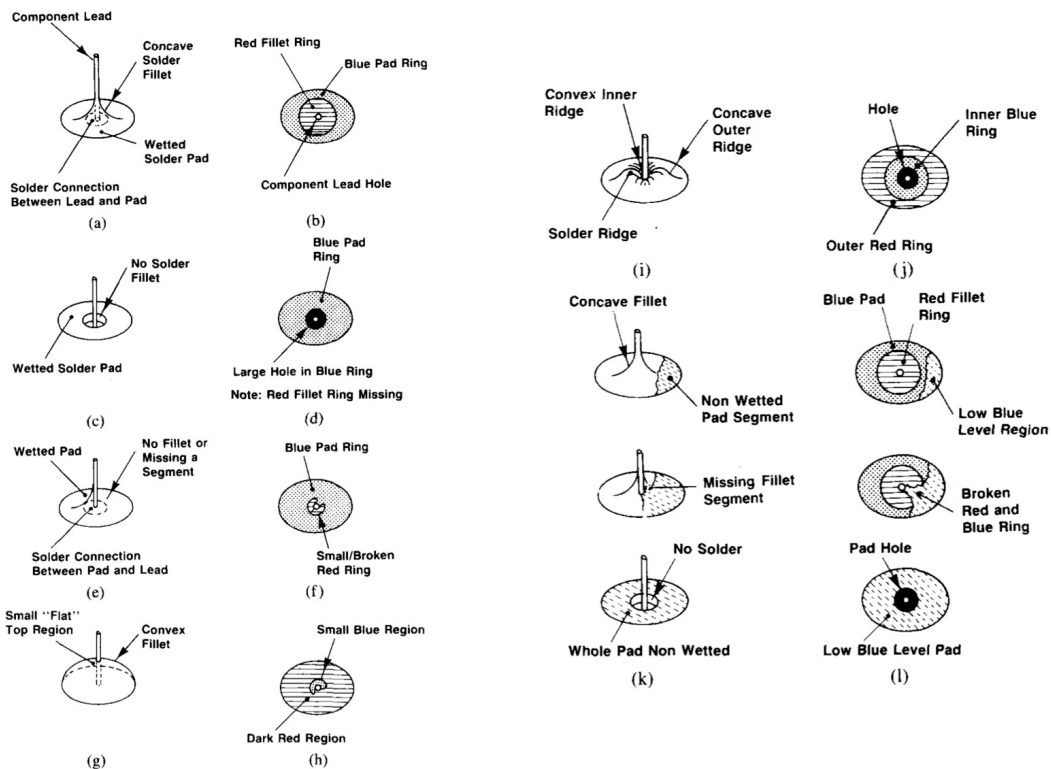


Figura 5.16: Difetti delle saldature e relative immagini “Tiered-Color Illumination”: (a) good solder joint, (b) good solder joint color contours, (c) no solder, (d) color contours for no solder, (e) insufficient solder, (f) color contours for insufficient solder, (g) excess solder, (h) color contours for excess solder, (i) poorly wetted lead, (j) contours of poorly wetted lead, (k) poorly wetted pad, (l) contours of poorly wetted pad.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo progetto è stato proposto e sviluppato un sistema di visione industriale in grado di creare modelli 3D di oggetti di varie tipologie e forme. Sono stati poi implementati metodi per il controllo di qualità che consentano l'identificazione di difetti presenti su schede elettroniche. Tali anomalie non sarebbero altrimenti individuabili con gli attuali sistemi di visione 2D. Vengono così presentati i vantaggi ottenibili con la tecnologia Extended 2.5D, sulla quale si basa il sistema di visione.

Il lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto europeo 3DComplete. In esso sono stabilite le specifiche richieste al sistema di visione, oltre alle modalità e i ai tempi utili alla pianificazione del lavoro. In particolare, sono state seguite le fasi di realizzazione hardware e software del sistema e l'implementazione delle procedure di calibrazione. È stato inoltre anticipato lo studio di alcune metodologie di controllo qualità per verificare le potenzialità dei modelli ottenuti. Con l'attività di tesi, all'interno di questo progetto, ho collaborato alla realizzazione hardware del sistema di visione, ho implementato la laser detection, effettuato le acquisizioni e ideato gli algoritmi di controllo qualità.

L'hardware impiegato per la realizzazione del sistema di visione è composto principalmente da una videocamera industriale e da due sorgenti di luce laser; il costo totale è contenuto e permette la vendita del sistema nel settore delle PMI, per le quali l'utilizzo dei sistemi di visione 3D attualmente presenti sul mercato risulta eccessivamente costoso.

I modelli 3D delle schede elettroniche relative ai test case del progetto 3DComplete permettono l'identificazione della quasi totalità dei difetti indicati dalle aziende. Per quanto riguarda il controllo di qualità sono stati ideati algoritmi per la ricerca di componenti elettronici, per il calcolo dell'inclinazione reciproca tra diversi componenti e per l'edge detection 3D che applicati ai casi in esame hanno dimostrato la giusta classificazione delle schede corrette e di quelle difettose. Si è voluto anche fornire alcuni strumenti di interfaccia grafica per una semplice configurazione dei parametri utili alla funzione di ricerca. Relativamente al controllo qualità su PCB è stata fornita un'idea riguardante un algoritmo di verifica della corretta di saldature.

I risultati finora ottenuti soddisfano i requisiti di progetto e pongono le basi per ulteriori sviluppi futuri. Tra questi si segnala la necessità di ottimizzare la fase di

acquisizione e di elaborazione dei modelli come viene descritto nella tesi ed eseguendo il porting del codice da Matlab al linguaggio C++. Si dovrà effettuare la registrazione dei modelli ottenuti con due laser utilizzando l'algoritmo ICP.

Per quanto riguarda il controllo di qualità, si suggerisce invece lo sviluppo di una funzione per la correzione delle zone d'ombra nell'immagine di range, utile per la 3D Edge detection.

Si dovrà poi procedere allo sviluppo di metodi per il controllo qualità di ordine generale e di un'interfaccia di configurazione completa e di semplice utilizzo. Si potrebbe non acquisire, ma costruire il modello di riferimento, ovviamente a partire da una o, meglio, più acquisizioni elaborate per eliminare il rumore e ottenere un modello "ideale".

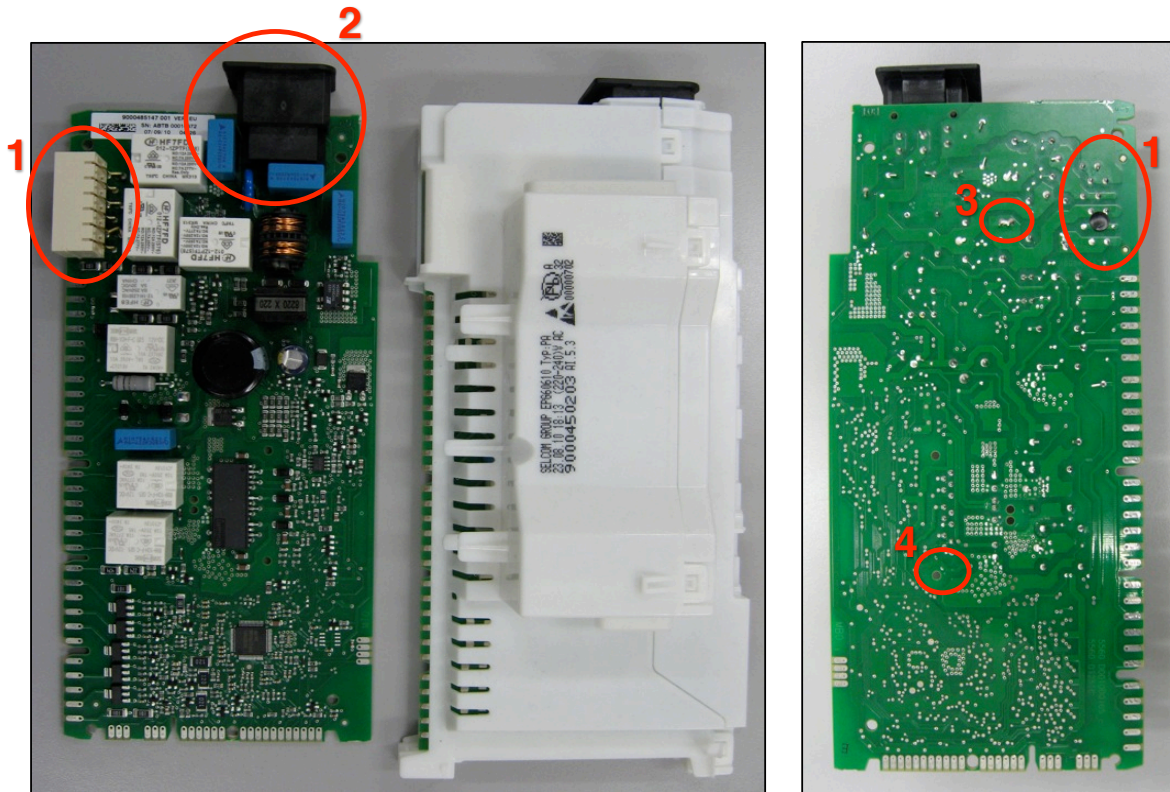
Un'altra idea che si propone per lo sviluppo futuro del progetto 3DComplete è di integrare questi concetti nei o con i CAD di progettazione delle schede elettroniche. Una buona parte delle informazioni per costruire il modello "ideale" potrebbe allora essere ricavata in anticipo dal CAD e poi integrata con le acquisizioni. Per esempio la posizione ideale dei componenti e delle saldature è più facilmente e correttamente fornita dal CAD. L'integrazione potrebbe anche servire per specificare e configurare già nel CAD i controlli richiesti.

Appendice A

Catalogo difetti Selcom, Fracarro, Cobra At

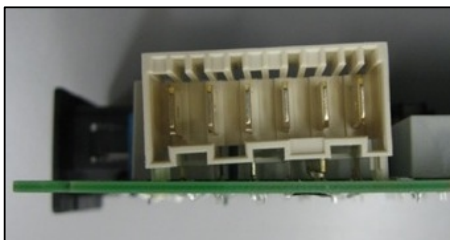
Catalog of defects

PCB Selcom Group (9000450203)

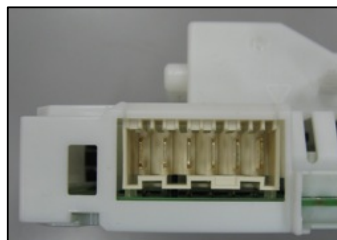


1. External white connector

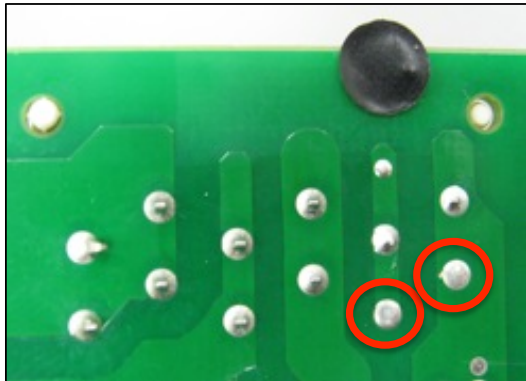
- Check presence/absence of connector;
- Control positioning of leads;
- Monitoring the inclination of the connector;
- Monitoring welding's quality of the leads.



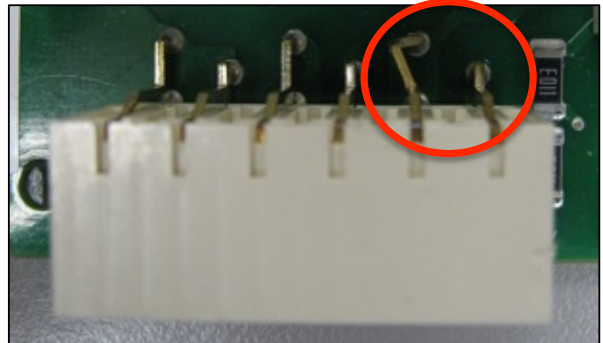
Incorrect positioning of the leads results in an angle that prevents the external case from closing properly



Proper position of the connector and the external case



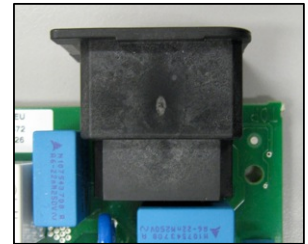
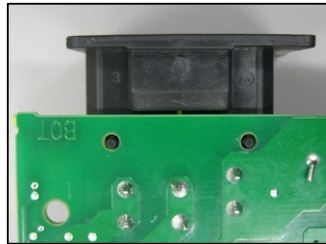
Lack of leads that were not positioned correctly



Wrong position of leads, that don't pass through the holes

2. External black connector

- Check presence/absence of connector;
- Monitoring position of connector;
- Monitoring the inclination of the connector.



External black connector

3. Short circuit

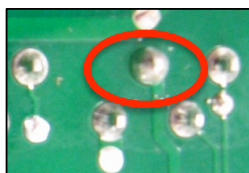
- Control of adjacent weldings that create a short circuit.



False short circuit

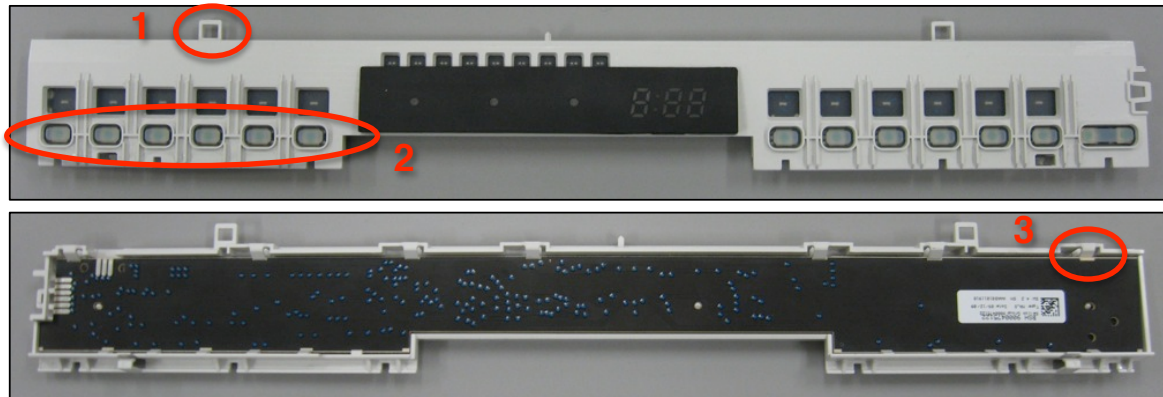
4. Soldering defects

- Check the amount of tin in solder of the leads.



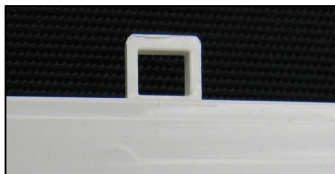
Tin excess

PCB Selcom Group (9000475122)



1. Integrity of the external case

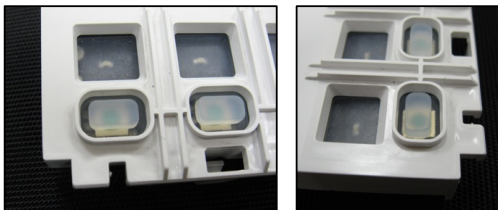
- Check presence/absence of connector.



Fixing point

2. Buttons

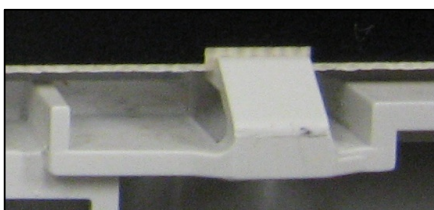
- Check position of buttons.



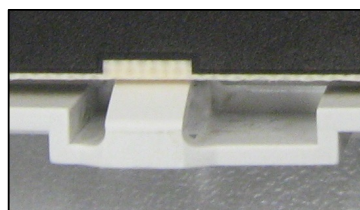
Correct assembly of the keys

3. Assembly

- Check correct installation of the board into the case.

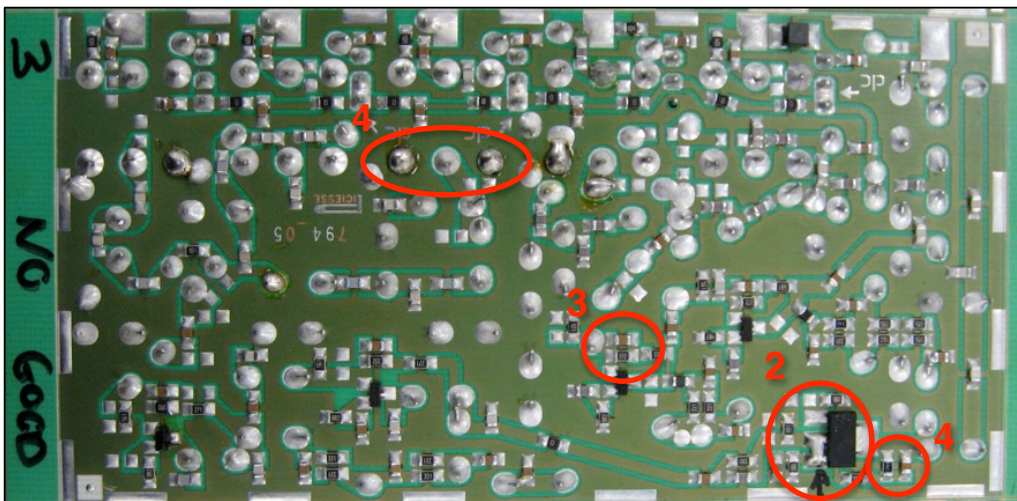
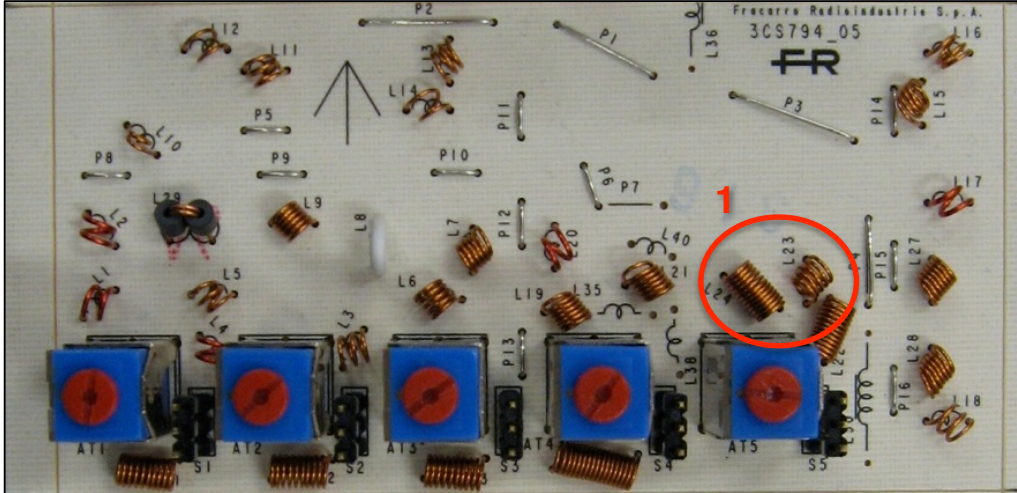


Correct



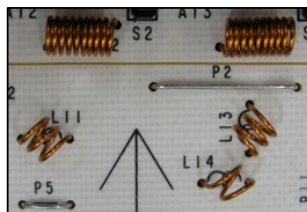
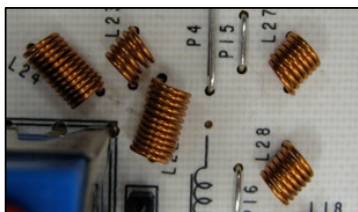
Wrong

PCB Fracarro (6BJ316)



1. Number of turns

- Check the number of turns.

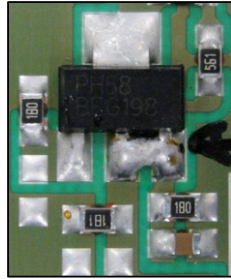


2. Short circuit between PIN

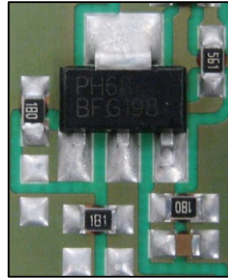
- Control of adjacent weldings that create a short circuit.



Wrong



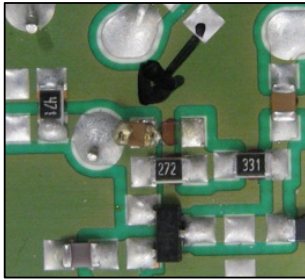
Wrong



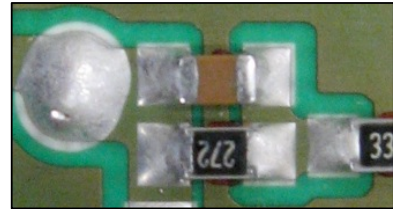
Correct

3. SMD devices

- Check presence/absence of components and they alignment.



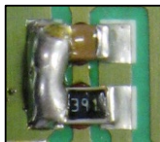
Wrong



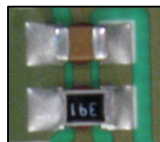
Correct

4. Soldering defects

- Check quality of weldings, which however do not create electrical problems.



Wrong



Correct

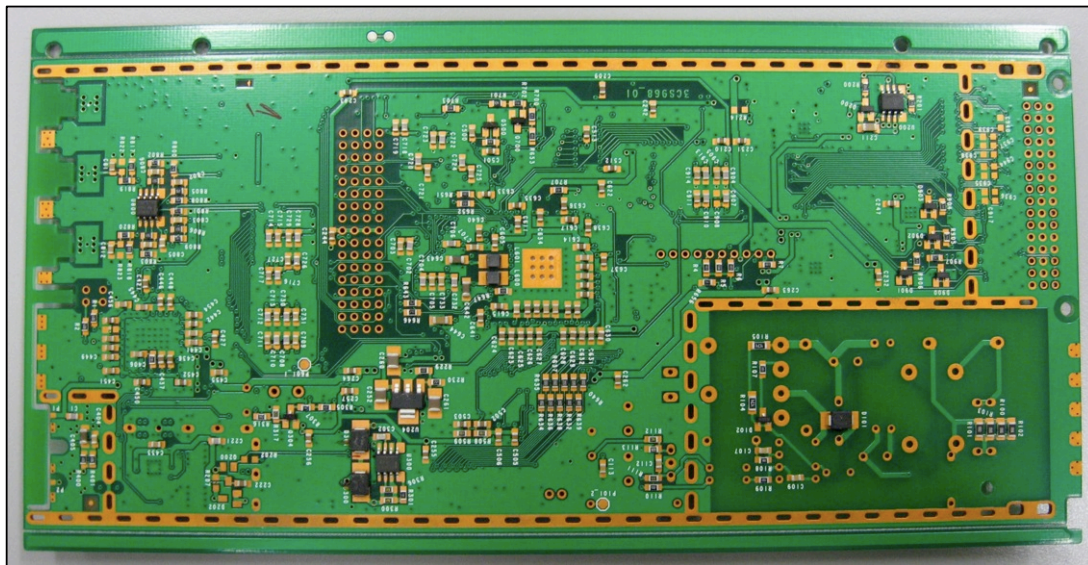
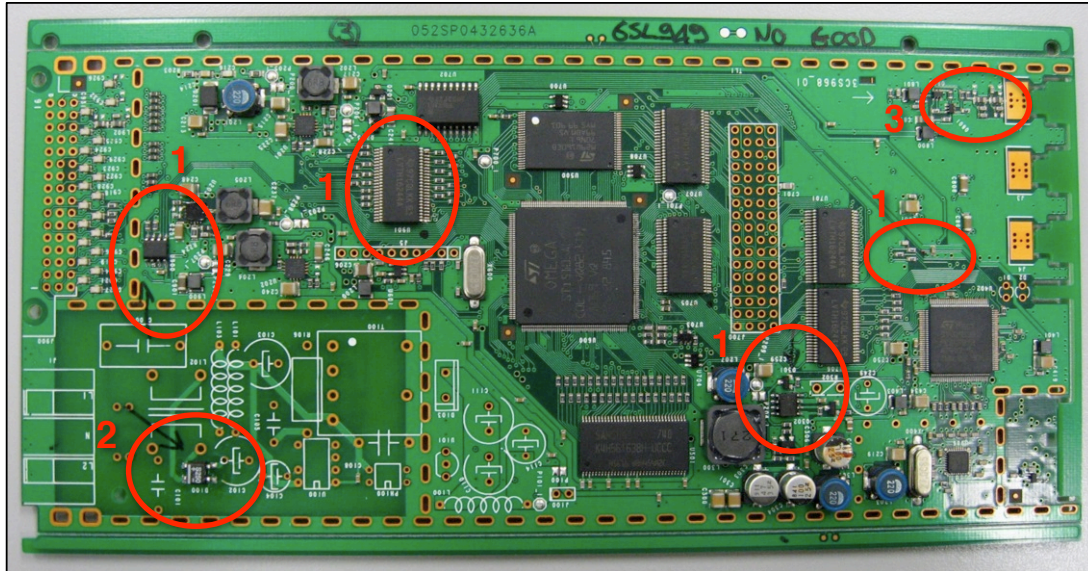


Wrong



Correct

PCB Fracarro (6SL949)



1. Weldings of integrated components and SMD devices

- Check quality of weldings.



Some example of wrong weldings

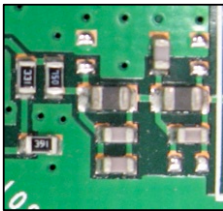
2. Alignment of integrated components

- Check correct position of components.

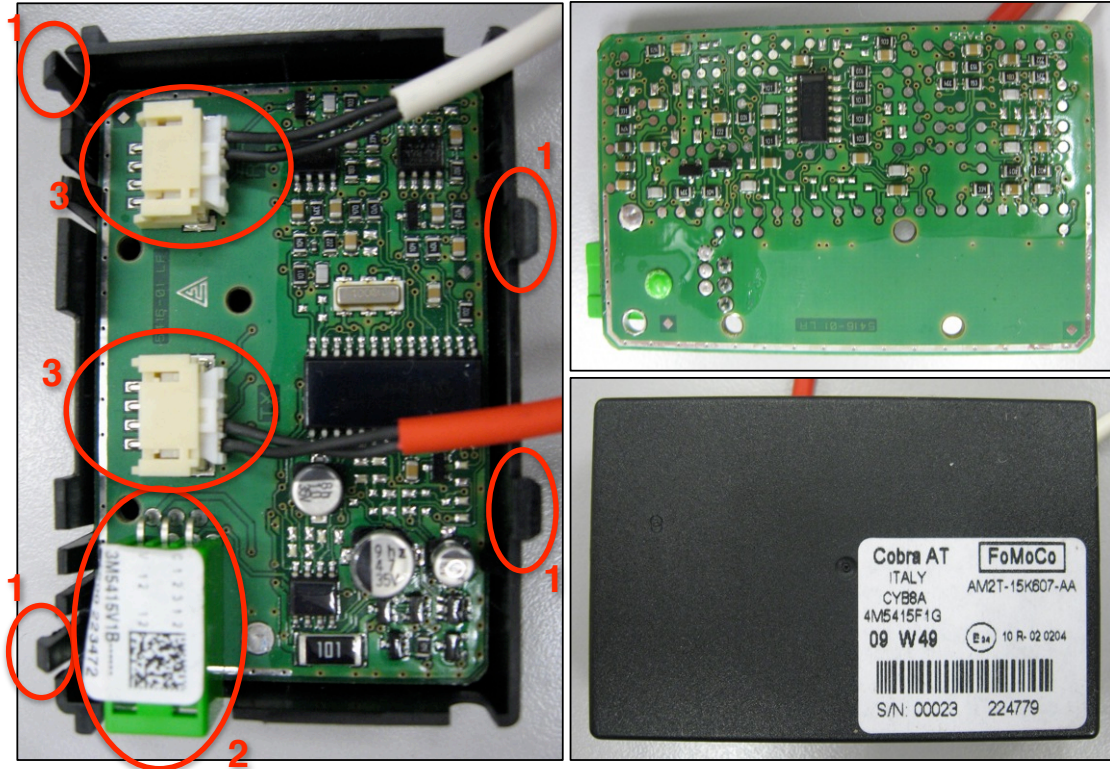


3. Absence of SMD devices

- Check presence/absence of SMD devices.

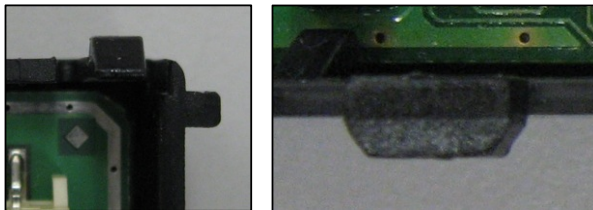


PCB Sicurelettronica (Cobra AT)



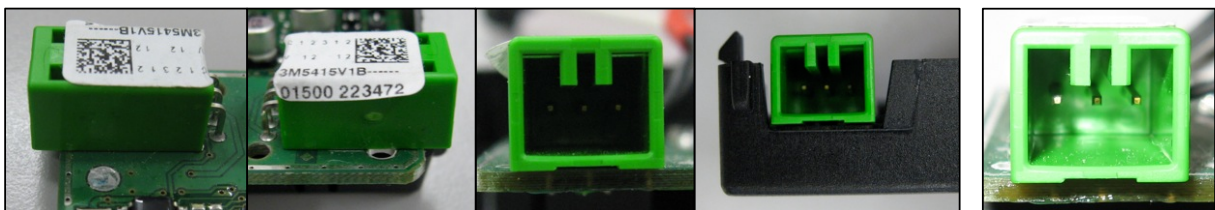
1. Plastic hooks

- Check presence/absence of plastic hooks of external case.



2. Green connector

- Check the colour of connector;
- Check that connector pins are straight.
- Monitoring position of connector.

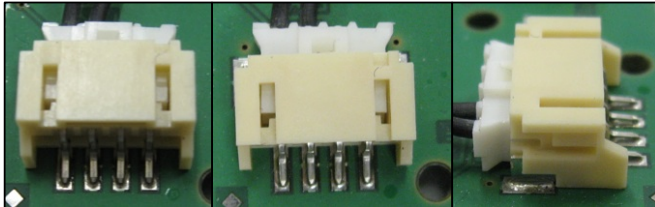


Correct position of green connector

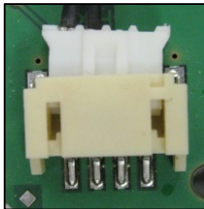
Pins

3. On-board connectors and cables

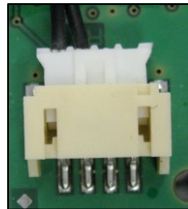
- Monitoring position of connectors;
- Check presence/absence of cables;
- Check colour of cables;
- Check correct connection of cables.



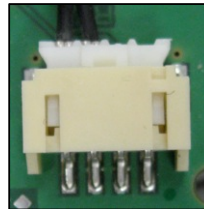
Correct position of one connector



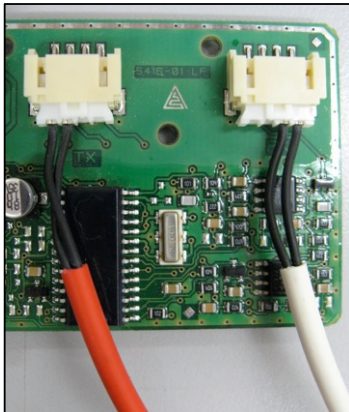
Wrong cable connection



Wrong cable connection

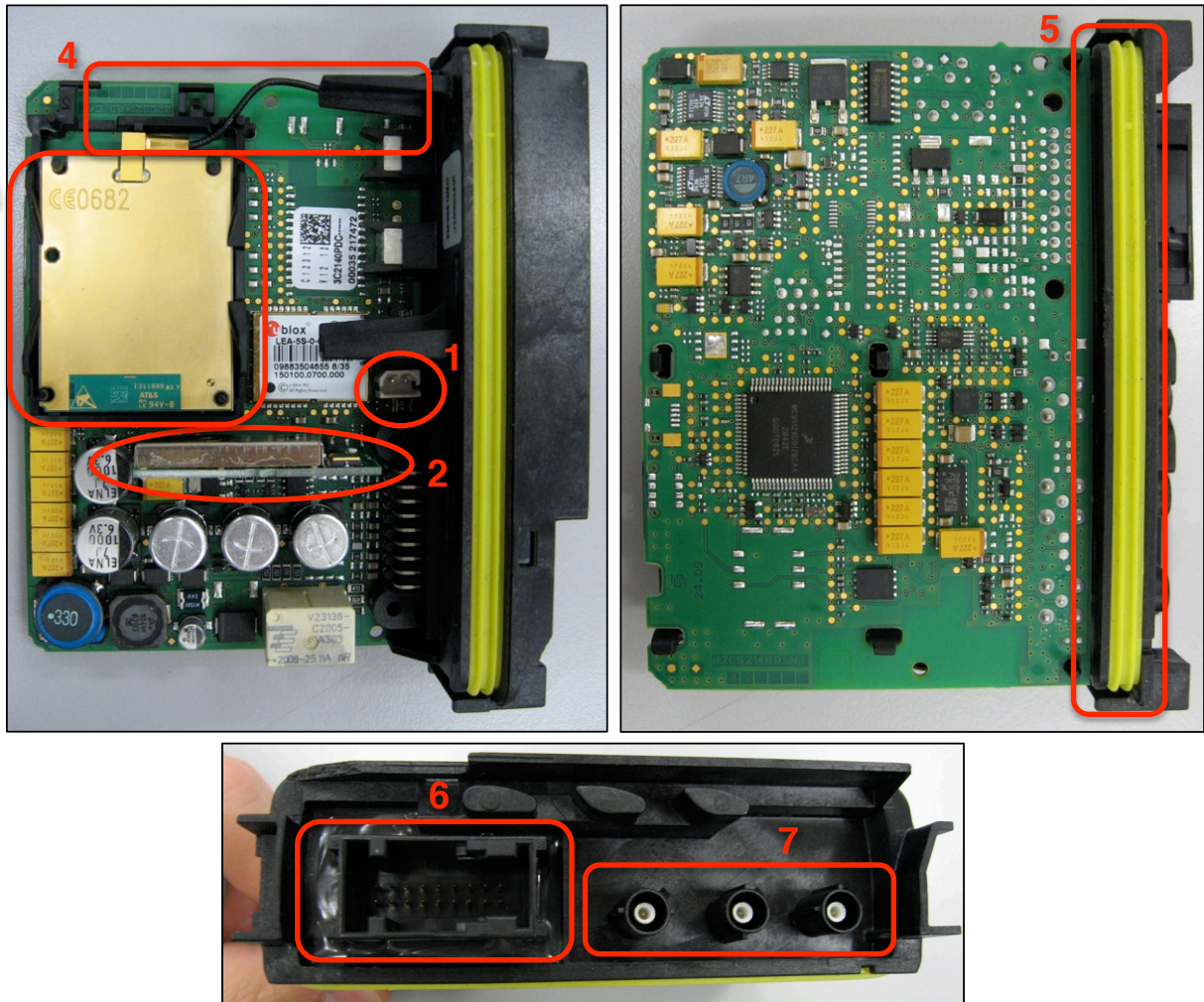


Correct cable connection



Presence and correct position of red and white cables

PCB Sicurelettronica (Cobra AT)



1. On-board connector

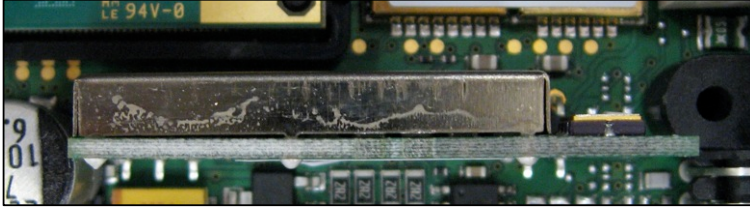
- Check correct orientation;
- Check integrity of the connector pins (height and orientation).



Correct

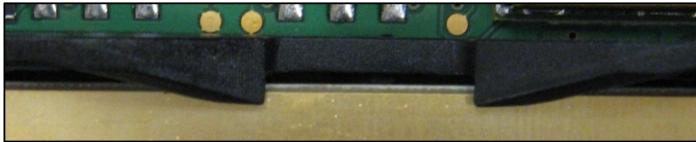
2. Radio module

- Check if the radio module is perpendicular to the PCB.



3. GSM module

- Check presence/absence of plastic hooks that hold the module;
- Check correct installation of the module: determine whether the module is securely mounted;
- Check the height and flatness of the phone to ensure full insertion of the connector;
- Check if the pegs are left.



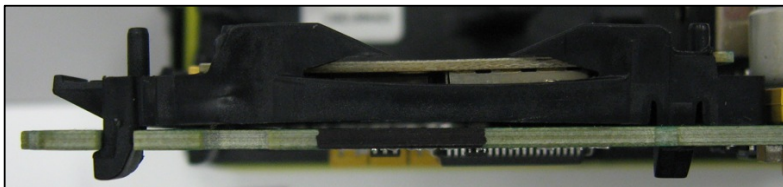
Plastic hooks: correct installation



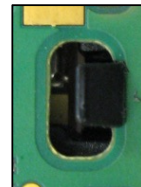
Plastic hooks: correct installation



Plastic hooks: wrong installation



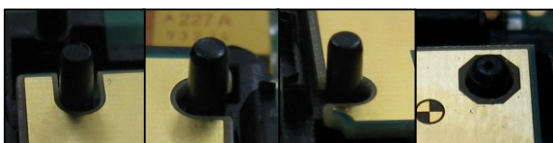
Correct installation of the module into the board



Correct



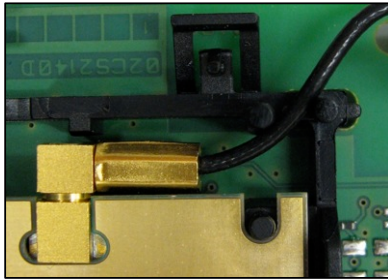
Wrong



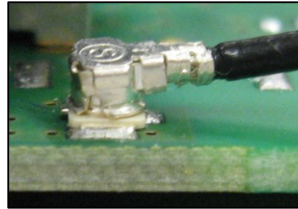
Pegs through the module

4. Cable of GSM module

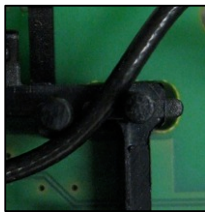
- Check the correct cable housing;
- Determine whether the plug is securely mounted.



Module connector and cable



Board connector



Correct



Wrong



Wrong

5. Yellow seal

- Check presence/absence of seal.



6. External connector

- Check integrity of the connector pins (height and orientation).



7. Antenna connectors

- Check that the antenna connectors are concentric;
- Check integrity of the connector pins (height and orientation).



Appendice B

Catalogo difetti BMW

2.2 BMW study case

2.2.1 Part description

In this case we have to inspect a plug mounted on a motor. The motor moves on a conveyor belt and stops for about 10 seconds. The relevant plug is mounted on top of the motor.

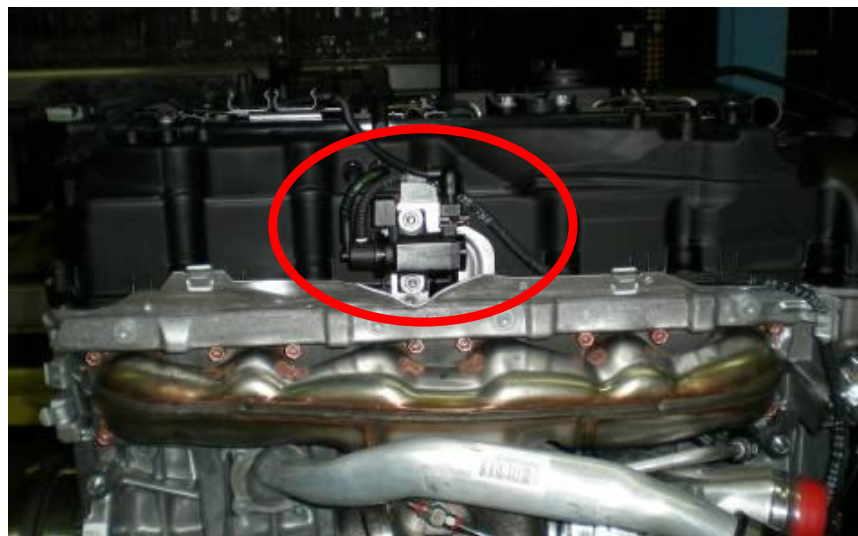
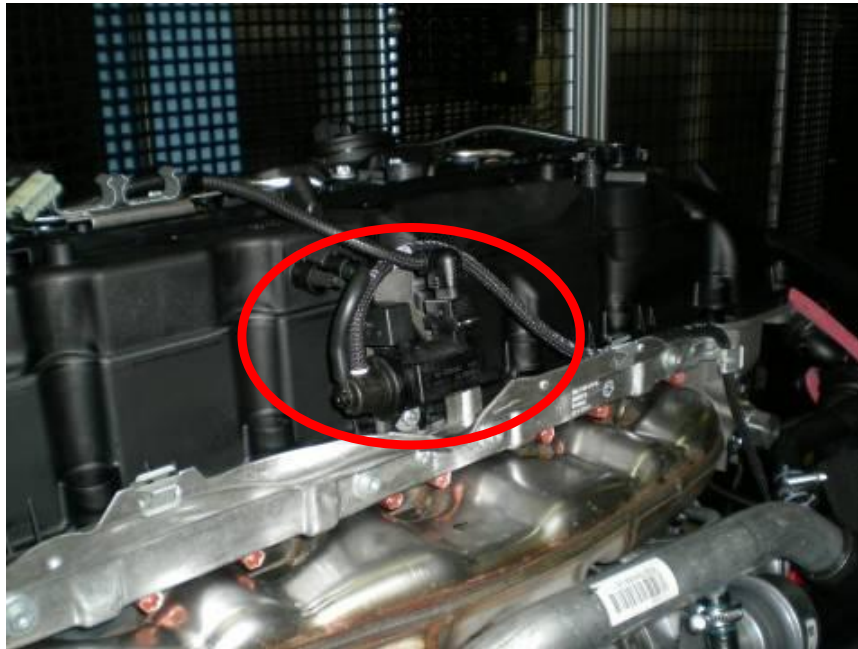


Figure 10: The part and its position on the engine.

2.2.2 What to inspect?

The plug (smaller part) is mounted on the black part in its upper side. The right image shows the correctly assembled part.



Figure 11: Plug and part separated (left) and correctly mounted (right).

There are two different types of defects that may occur. The plug is not correctly placed on the part, it is just loosely put on the part. The red line shows where the lower end of the plug (green line) should actually be positioned.



Figure 12: First of the possible assembly faults: plug completely connected.

The second type of defect is that the plug is not fully attached to the part. This can best be seen by looking at the silver bar (compare position of the bar in the lower (correct) and upper (defective) image).

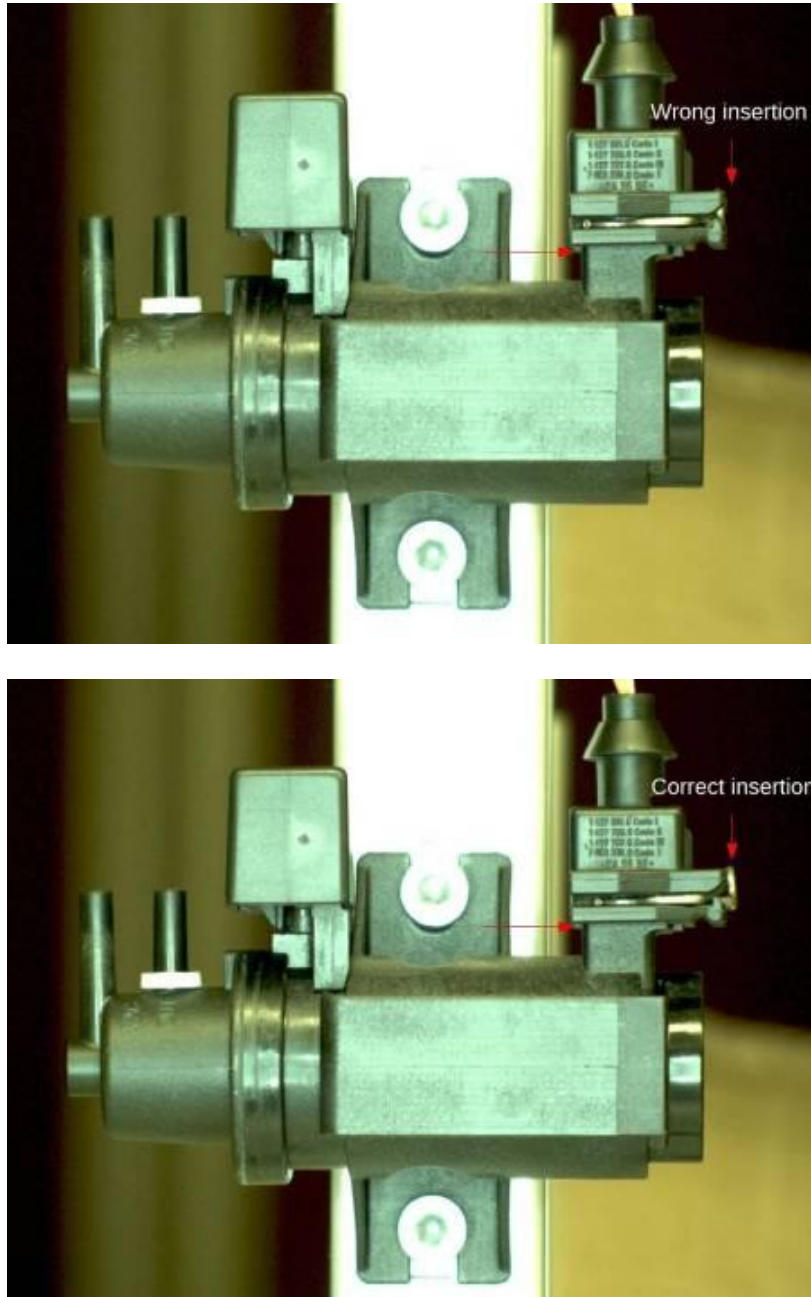


Figure 13: Second of the possible assembly faults: metal tab out.

Appendice C

Catalogo difetti Ardoran

2.4 Ardoran study case

2.4.1 Part description

Easy Listen 100 is an electronic device covered by a metal housing with plugs, screws and leds. The dimensions are 167 x 145 x 60mm (with cover).

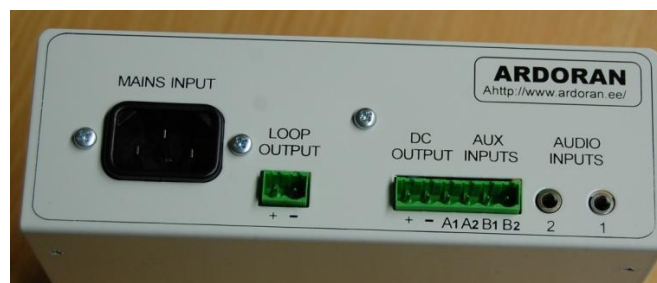


Figure 18: Easy Listen 100 images.

2.4.2 What to inspect?

Parts of various sizes and characteristics are assembled in this product. Some of them are listed in the table below.

Name	Size[mm]	Characteristics
Powerplug	30x22x22	Darksurface,reflectivepins
Capacitors	5–12x12–27	DarkBody,reflectivetop
Ribboncable	1x20x60	Graysurface,flexible
Fuse	4x20	Transparent
Transformer	60x50x45	MetalandPlastics,reflective wire
Resistor	1x6	Reflectivepins
Smdcomponents	1x2x0.5	Reflectivepins,verysmall

Possible failures:

- Missing or wrong assembled parts
- Destroyed transformer mounting device
- Unplugged cables

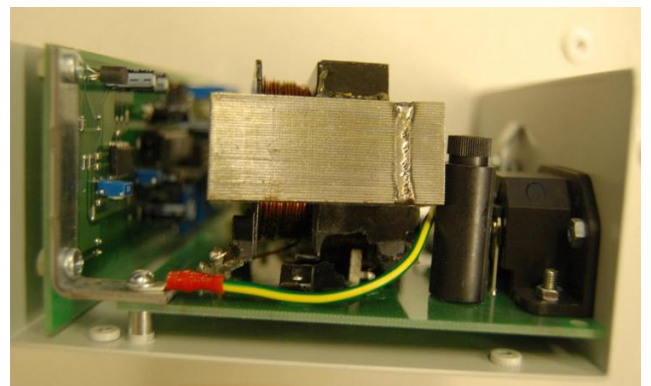
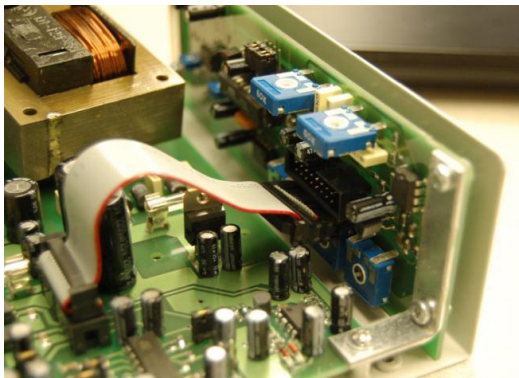


Figure 19: Unplugged cable (left) and defect transformer mounting device (right).

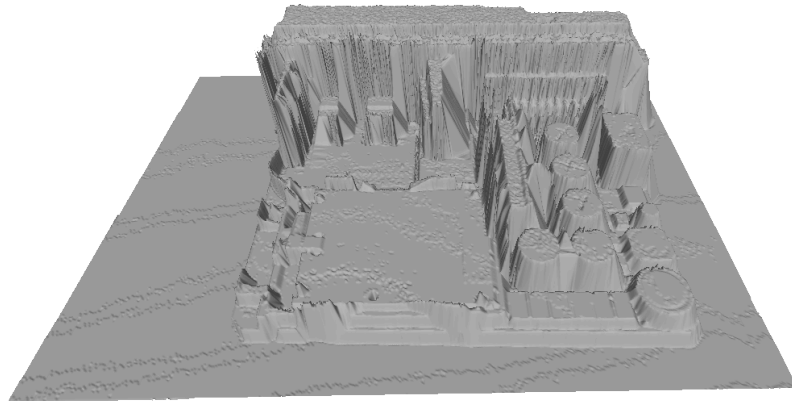
2.4.3 Preliminary inspection tasks

In order to check all the possible defects a 2.5D scan of the board from the top could be enough. This will get clear when developing the relative inspection algorithms.

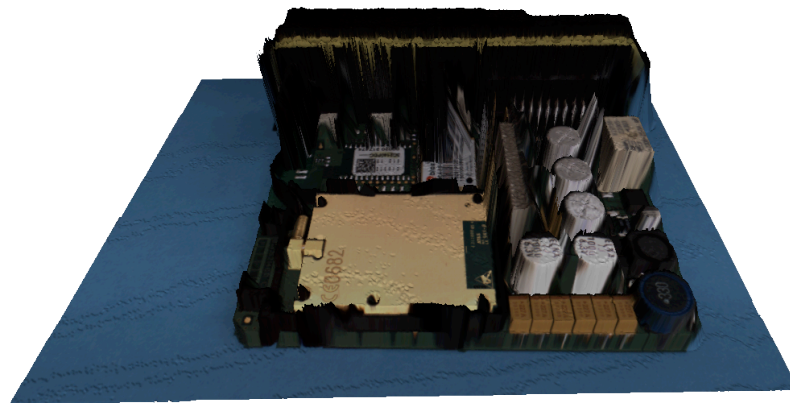
Appendice D

Risultati e modelli

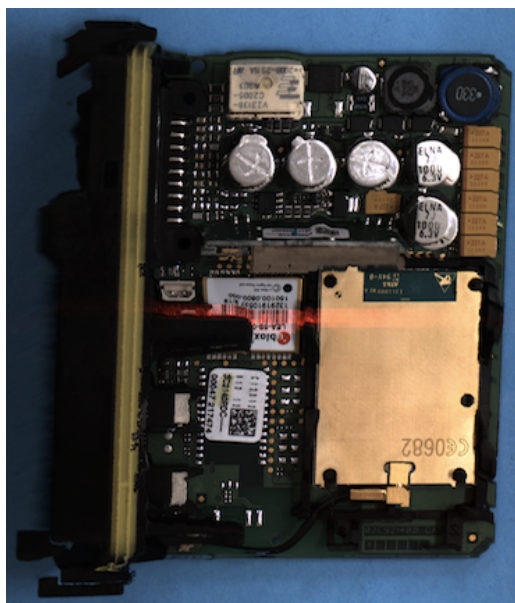
D.1 Cobra (1 laser)



Modello 3D (1 laser)



Modello 3D e texture (1 laser)



Ortoimmagine senza correzione della direzione di acquisizione

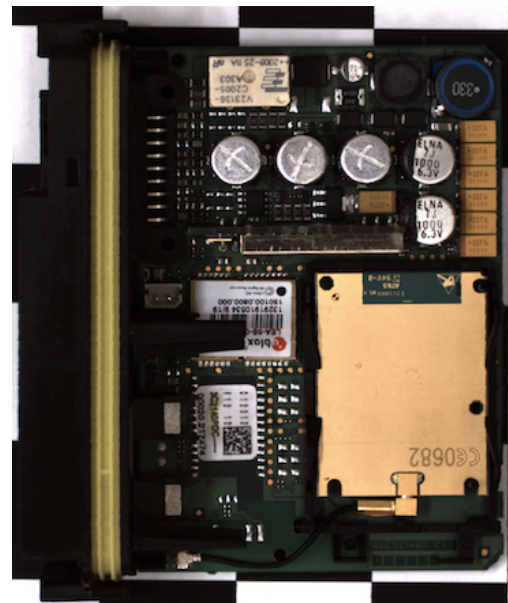
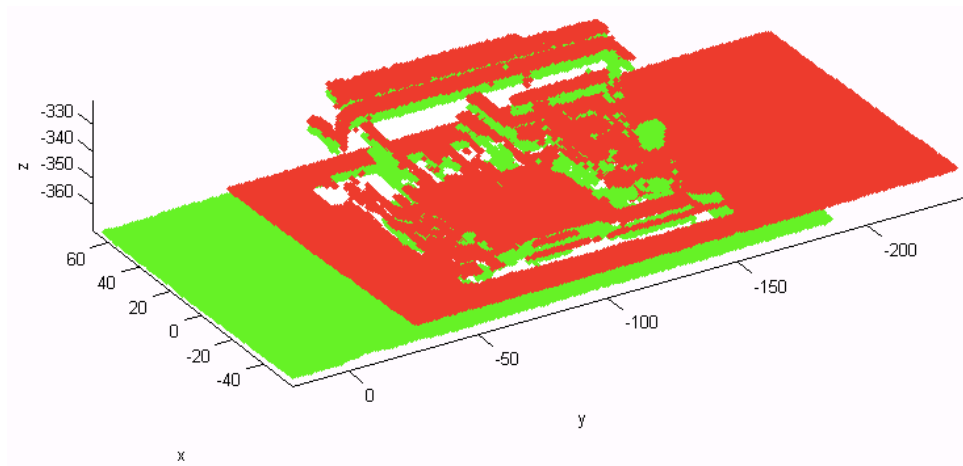


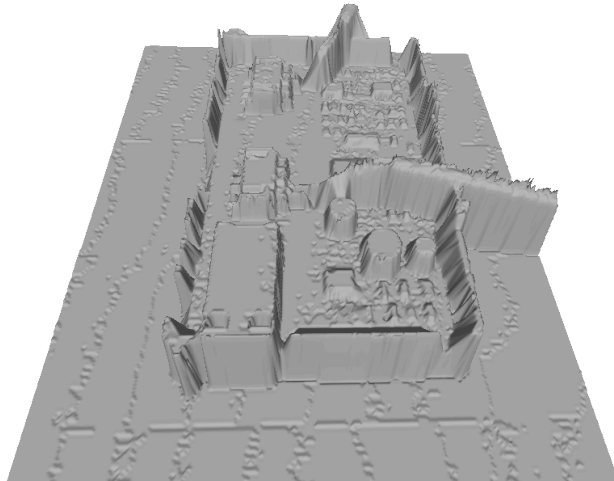
Immagine ottenuta tramite stitching con correzione della direzione

D.2 Cobra (2 laser)

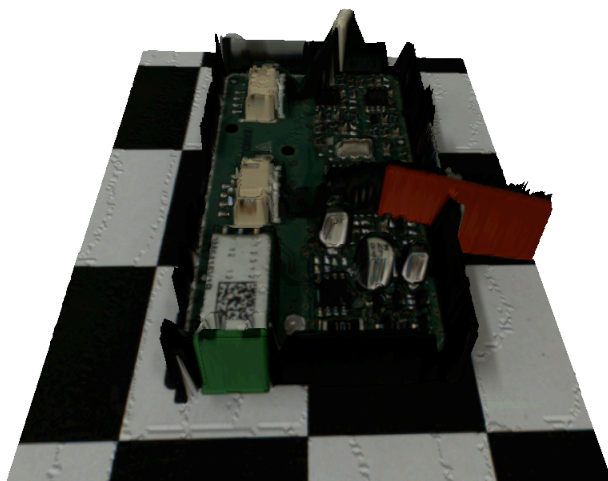


Visualizzazione dei punti triangolati ottenuti con i due laser

D.3 Cobra B (1 laser)

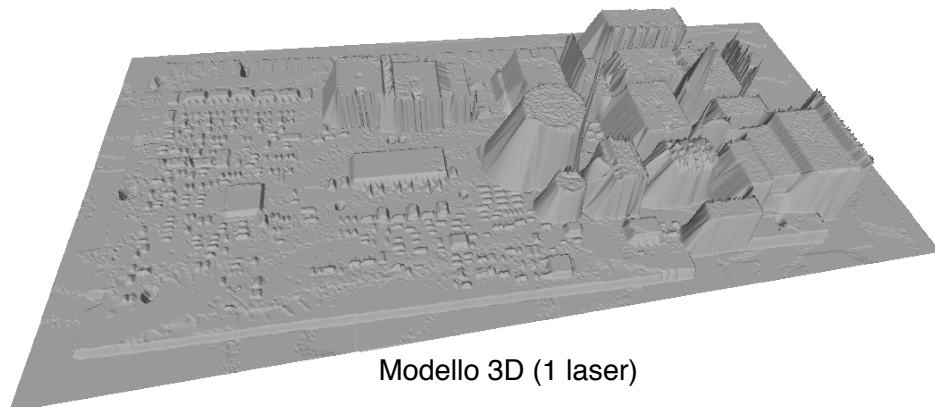


Modello 3D (1 laser)

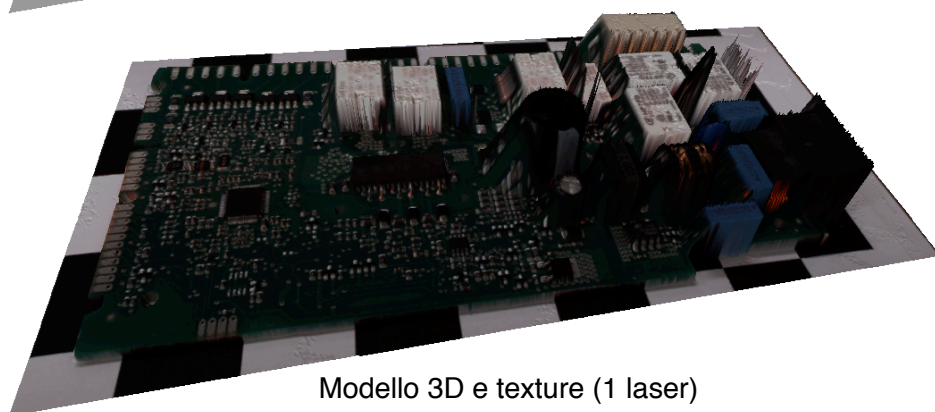


Modello 3D e texture (1 laser)

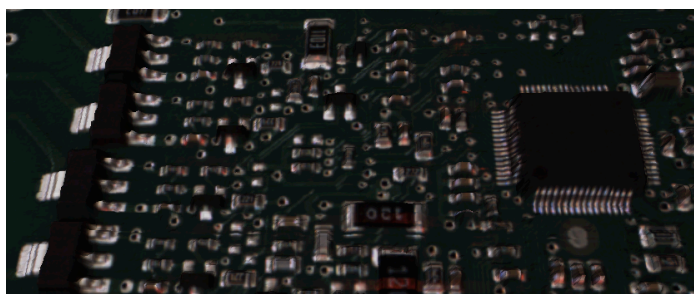
D.4 Selcom (1 laser)



Modello 3D (1 laser)



Modello 3D e texture (1 laser)



Vista dettagliata di una zona (1 laser)

Bibliografia

- [1] *Efficient 3D Completeness Inspection*. Link al sito web del progetto: <http://www.3dcomplete.eu/>.
- [2] 3DComplete, *Description of work*, 2010.
- [3] R. Mayer, *Scientific Canadian: Invention and Innovation From Canada's National Research Council*, Vancouver: Raincoast Books, 1999.
- [4] SICK IVP, <http://www.sickivp.se/>.
- [5] Micro-Epsilon, <http://www.micro-epsilon.de/>.
- [6] Li Hui, Liping Di, Huang Xianfeng, et al., *Laser Intensity Used in Classification of Lidar Point Cloud Data*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008. IGARSS 2008. Volume: 2, pp. II-1140-II-1143, July 2008.
- [7] PMDTechnologies GmbH, <http://www.pmdtec.com/>.
- [8] PMDTechnologies GmbH, *A performance review of 3D TOF vision systems in comparison to stereo vision systems*.
- [9] Wikipedia, *Time-of-flight camera*, http://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera.
- [10] Seitz, S., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., and Szeliski, R., *A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms*. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'2006), pages 519–526, New York, NY.
- [11] Z Corporation, <http://www.zcorp.com/>.
- [12] ViALUX Messtechnik and Bildverarbeitung GmbH, <http://www.vialux.de/>.
- [13] Graham D. Finlayson, Steven D. Hordley, and Mark S. Drew, *Removing Shadows from Images*, Lecture Notes In Computer Science; Vol. 2353, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part IV, 2002.
- [14] Graham D. Finlayson, Mark S. Drew, and Cheng Lu, *Intrinsic Images by Entropy Minimization*, T. Pajdla and J. Matas (Eds.): ECCV 2004, LNCS 3023, pp. 582–595, 2004.

- [15] Jianguang Lou, Hao Yang, Weiming Hu and Tieniu Tan, *An Illumination Invariant Change Detection Algorithm*, ACCV2002: The 5th Asian Conference on Computer Vision, 23–25 January 2002, Melbourne, Australia.
- [16] Yuri A. Ivanov, Aaron F. Bobick, and John Liu, *Fast lighting independent background subtraction*, International Journal of Computer Vision, vol. 37, no. 2, pp. 199–207, 2000.
- [17] Ognjen Arandjelovic and Roberto Cipolla, *Achieving Illumination Invariance using Image Filters*, *Face Recognition*, Book edited by: Kresimir Delac and Mislav Grgic, ISBN 978-3-902613-03-5, pp.558, I-Tech, Vienna, Austria, June 2007.
- [18] Wikipedia, *3D scanner*, http://en.wikipedia.org/wiki/3D_scanner.
- [19] Wikipedia, *Structured-light 3D scanner*, http://en.wikipedia.org/wiki/Structured-light_3D_scanner.
- [20] Jean-Yves Bouguet, *Camera Calibration Toolbox for Matlab® with a complete documentation*. Disponibile al link: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html/.
- [21] Tsai, R. Y. *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses*. IEEE Journal of Robotics and Automation RA-3(4): 323-344, 1987).
- [22] Janne Heikkilä and Olli Silvén, *A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction*, Oulu, Finland.
- [23] Andrea Fusiello, *Visione Computazionale - Appunti delle lezioni*, 2008.
- [24] Nicosevici T., Gracias N., Negahdaripour S. & Garcia R., *Efficient 3D modeling and mosaicing*, Journal of Field Robotics, vol. 26, no. 10, pp. 759-788, 2009.
- [25] David W. Capson, Sai-Kit Eng, *A Tiered-Color Illumination Approach for Machine Inspection of Solder Joints*.
- [26] P. D. Kovesi, *MATLAB and Octave Functions for Computer Vision and Image Processing*. Centre for Exploration Targeting. School of Earth and Environment. The University of Western Australia. Disponibile al link: <http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/research/matlabfns/>.