



POLITECNICO
DI TORINO

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

Applicazioni della computer vision ai sistemi per il collaudo di dispositivi elettronici

Relatore

prof. Matteo Sonza Reorda

Candidato

Andrea FONTI

Supervisore aziendale
SPEA

Cristiano Barla

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Sommario

Il seguente lavoro di tesi si è svolto all'interno del progetto di Laurea in alto Apprendistato promosso da Regione Piemonte, Politecnico di Torino e SPEA. L'inserimento è avvenuto all'interno del reparto di ricerca e sviluppo software con l'obiettivo di formare un team in grado di soddisfare la richiesta di sistemi sempre più pervasi da verifiche di natura ottica, ciò ha portato alla realizzazione di una libreria software adatta alla visione industriale e alla realizzazione di un ambiente di sviluppo per programmi di verifica ottica. La libreria implementata è adesso utilizzata in produzione su alcuni sistemi di collaudo e rappresenta un miglioramento su manutenibilità e aggiornabilità delle unità di visione prodotte. L'ambiente di sviluppo per test ottici realizzato durante il percorso di tesi è attualmente utilizzato da aziende nel mercato dei semiconduttori per l'affinamento, lo sviluppo e la modifica dei test ottici sulle loro linee di collaudo SPEA.

SPEA opera nel campo del collaudo automatico di dispositivi elettronici, quali microchip, schede e moduli elettronici. In particolare, SPEA progetta e realizza sofisticate apparecchiature che consentono ai produttori di dispositivi elettronici di effettuare, in maniera automatica, tutte le misure necessarie a verificare che un dispositivo elettronico funzioni correttamente.

Nel primo capitolo verrà introdotta l'ispezione ottica automatica.

Nel secondo capitolo verranno descritti i sistemi di *imaging*, l'esposizione comincerà con una panoramica sui sensori per l'acquisizione di immagini, interfacce di connessione disponibili e problematiche relative a differenti tipi di otturatore. Il secondo capitolo proseguirà con dei richiami di ottica e una panoramica sulle aberrazioni ottiche necessaria a comprendere come si possa applicare l'ispezione ottica con accuratezza metrologica e come sorga la necessità di applicare diverse tecniche di illuminazione.

Nel terzo capitolo verrà esposto come un'immagine digitalizzata possa essere elaborata da una macchina. Verrà presentata la rappresentazione digitale di un'immagine e alcune tecniche di processamento delle immagini (puntuali, locali e globali). Le tecniche proposte saranno volte al miglioramento delle acquisizioni prima dell'effettiva elaborazione, il cui fine è la determinazione dell'esito dell'ispezione.

Nel quarto capitolo verrà presentata l'ispezione ottica automatica con particolare attenzione alle tipologie di ispezioni ottiche attuabili nella produzione di circuiti stampati (PCB). Verranno presentati alcuni sistemi di collaudo prodotti da SPEA che integrano al loro interno funzionalità di ispezione ottica automatica (sistemi su cui è stata utilizzata la libreria oggetto dell'attività in azienda) o che utilizzino l'equipaggiamento di visione

per prendere alcune decisioni sul flusso di collaudo o sull'instradamento dei dispositivi da collaudare.

Nel quinto capitolo verrà presentata l'architettura della libreria di visione sviluppata corredandola con un analisi dei requisiti ed una panoramica sulle esigenze del particolare dominio applicativo e dell'industria elettronica.

Nel sesto capitolo verranno presentate conclusioni e sviluppi futuri di questo lavoro.

Risultato di questo lavoro di tesi è quindi una libreria software per la visione industriale adatta ad essere impiegata sui sistemi di collaudo SPEA, ciò ha portato a soddisfare con successo le seguenti esigenze:

1. Facilità di integrazione di nuovo hardware di visione.
2. Interfaccia di programmazione coerente e sufficientemente generale.
3. Tempi di esecuzione adeguati ai tempi di ciclo del sistema di collaudo.
4. Presenza di un ambiente di sviluppo utilizzabile anche da non programmati.
5. Standardizzazione dell'infrastruttura di visione e quindi progressiva migrazione di tutti i sistemi di collaudo SPEA verso la nuova infrastruttura.

Indice

Sommario	II
1 Ispezione ottica automatica	1
1.1 Storia	2
2 Sistemi di imaging	3
2.1 Sensori	3
2.1.1 CCD	4
2.1.2 CMOS	4
2.1.3 Caratteristiche di un sensore	6
2.1.4 Standardizzazione delle interfacce di comunicazione	9
2.2 Richiami di ottica	10
2.2.1 Rifrazione - legge di Snell	10
2.2.2 Riflessione	11
2.2.3 Lenti	13
2.2.4 Gli specchi	14
2.2.5 Approssimazione parassiale	15
2.2.6 Aberrazione	16
2.2.7 Aberrazione Sferica	16
2.2.8 Coma	17
2.2.9 Astigmatismo	18
2.2.10 Curvatura di campo	18
2.2.11 Distorsione	18
2.2.12 Aberrazione cromatica	20
2.2.13 Ingrandimento e luminosità	20
2.3 Illuminazione	21
2.3.1 Illuminazione direzionale	22
2.3.2 Illuminazione tangenziale	22
2.3.3 Illuminazione diffusa	23
2.3.4 Illuminazione anulare	23
2.3.5 Illuminazione diffusa assiale	24
2.3.6 Illuminazione strutturata	24
2.3.7 Illuminazione polarizzata	25

2.3.8	Illuminazione dark-field	25
2.3.9	Retroilluminazione (bright-field).	25
2.4	Lenti	26
2.4.1	Terminologia	26
2.4.2	Plano Convex	26
2.4.3	Double Convex	26
2.4.4	Plano Concave	27
2.4.5	Double Concave	27
2.4.6	Acromatico positiva	28
2.4.7	Asferica	28
3	Visione artificiale	29
3.1	Processamento delle immagini	29
3.1.1	Immagine reale	29
3.1.2	Immagine digitale	30
3.1.3	Tipi di operazioni sulle immagini	31
3.1.4	Iistogramma dei livelli di grigio	31
3.1.5	Binarizzazione	33
3.1.6	Soglia basata su istogramma	35
3.1.7	Compensazione dello sfondo	36
3.1.8	Operatori locali	36
3.1.9	Filtri di smoothing	36
3.1.10	Filtri di sharpening	38
3.1.11	Canny edge detector	40
3.2	Riconoscimento di oggetti	41
3.2.1	Template matching	42
3.2.2	Funzioni per la descrizione dell'immagine	43
3.2.3	Signature	43
3.2.4	Dalla rappresentazione alla descrizione	43
4	Ispezione automatica dei dispositivi elettronici	45
4.1	Principio di funzionamento di un sistema AOI	46
4.2	Tipologie di ispezione ottica automatica delle schede elettroniche	46
4.2.1	Presenza di un componente	46
4.2.2	Posizionamento di un componente	47
4.2.3	Identificazione di un componente	47
4.2.4	Test della saldatura	48
4.2.5	Test del circuito stampato	48
4.2.6	Riconoscimento di punti fiducial	49
4.3	Sistemi di collaudo SPEA	49
4.3.1	Flying probe	49
4.3.2	Pick and Place handler	53
4.3.3	Spea RSU	54
4.3.4	Tipi di ispezione ottica effettuati da pick and place handler	54

5 Spea.Vision Library	57
5.1 Dominio applicativo	57
5.1.1 Acquisizione	58
5.1.2 Filtri	58
5.1.3 Test ottici	58
5.1.4 Persistenza	58
5.1.5 Conversione	59
5.1.6 Gui	59
5.2 Requisiti	59
5.2.1 Acquisizione	59
5.2.2 Filtri	60
5.2.3 Test ottici	61
5.2.4 Persistenza	61
5.2.5 Conversione	62
5.2.6 Gui	62
5.2.7 Generali	63
5.3 Scelte progettuali	63
5.3.1 Linguaggio di programmazione	63
5.3.2 Tecnologie utilizzate	64
5.4 Architettura	65
5.4.1 Allocazione degli assembly	65
5.4.2 Provider	66
5.4.3 VisionContext	67
5.4.4 Interfaccia fluida	68
5.4.5 Acquisizione	68
5.4.6 Filtri	70
5.4.7 Test Ottici	71
5.5 Spea Optical Test App	74
5.5.1 Principio di funzionamento	75
5.5.2 Ambiente di verifica	75
6 Conclusioni	81
Bibliografia	83

Elenco delle figure

2.1 Sistema di imaging per l'ispezione automatica	3
2.2 Schema a blocchi di un dispositivo CCD	5
2.3 Schema a blocchi di un dispositivo CMOS	5
2.4 Singolo elemento fotosensibile RGB con filtro NIR	6
2.5 Dimensioni sensore	7
2.6 Velocità dell'otturatore	8
2.7 Otturatore globale e otturatore rolling su soggetto in movimento	9
2.8 Riflessione e rifrazione	10
2.9 Rifrazione	12
2.11 Lenti	14
2.12 Formazione dell'immagine	14
2.13 Specchi	15
2.14 Prisma diagonale	15
2.15 Aberrazione sferica	17
2.16 Coma	17
2.17 Astigmatismo	18
2.18 Curvatura di campo	19
2.19 Distorsione	19
2.20 Aberrazione cromatica	20
2.21 Doppietto acromatico	21
2.22 Illuminazione direzionale	22
2.23 Illuminazione tangenziale	23
2.24 Illuminazione diffusa	23
2.25 Illuminazione anulare	23
2.26 Illuminazione diffusa assiale	24
2.27 Illuminazione strutturata	24
2.28 Illuminazione polarizzata	25
2.29 Illuminazione dark-field	25
2.30 Illuminazione brightfield	26
2.31 Lente Plano-Convex	27
2.32 Lente Double Convex	27
2.33 Lente Plano Concave	27
2.34 Lente Double Concave	28
2.35 Lente Acromatica positiva	28

2.36 Lente Asferica	28
3.1 Rappresentazione numerica di un immagine	31
3.2 Operazione puntuale, locale, globale.	32
3.3 Iistogramma dei livelli di grigio.	32
3.4 Trasformazioni su istogramma.	33
3.5 Inversione dei livelli di grigio.	33
3.6 Compressione logaritmica.	34
3.7 Compressione potenza.	34
3.8 Esempio di espansione del contrasto.	34
3.9 Prima dell'equalizzazione.	35
3.10 Dopo l'equalizzazione.	35
3.11 Applicazione di un operatore locale.	37
3.12 Filtri di smoothing - Media	37
3.13 Filtri di smoothing - Gaussiano con media 0 e dev standard 0.5	38
3.14 Filtri di smoothing - Blurring con dimensioni maschera differenti	38
3.15 Laplaciano	39
3.16 Laplaciano applicato ad un immagine	39
3.17 Correzione del segnale originale con laplaciano	39
3.18 Laplacian sharpening	40
3.19 Template matching	42
3.20 Signatures	44
4.1 Test di presenza	46
4.2 Test di posizionamento	47
4.3 Test della saldatura	48
4.4 Flusso di un programma di ispezione ottica tramite pattern matching su flying probe SPEA	52
5.1 Provider.	66
5.2 Spea.Vision.Core	67
5.3 Acquisizione.	69
5.4 Spea.Vision.Core - Acquisizione	69
5.5 Originale - Binarizzazione adattiva - Operazione bitwise(NOT)	72
5.6 Originale - Sfocatura - Canny Edge Detector	72
5.7 Originale - Rimozione componenti connesse - Equalizzazione dell'istogramma	74
5.8 Originale - Correzione Gamma - Trasformata di Hough	74
5.9 Originale - Sharpening Laplaciano - Morfologia (erosione)	75
5.10 Originale - Binarizzazione alla Otsu - Unsharp mask	75
5.11 Originale - Operatore di Scharr, fasi - moduli	76
5.12 Spea.Vision.Filters	77
5.13 Spea.Vision.OpticalTest	78
5.14 Optical Test App - Finestra principale	79
5.15 Optical Test App - Pannello di verifica	79

Capitolo 1

Ispezione ottica automatica

Tradizionalmente, l'ispezione visuale ed il controllo qualità sono stati affidati a personale esperto.

Nonostante un uomo possa fare questo lavoro, l'individuo è più lento e si stanca facilmente, oltretutto il personale esperto è difficile da trovare e tenere aggiornato in un ambito industriale richiedendo formazione e un considerevole tempo di apprendimento; in alcuni casi l'ispezione può essere tediosa o difficile, anche per i migliori esperti.

Alcuni anni fa, l'industria di produzione di elettronica vedeva l'introduzione di una tecnologia di ispezione ottica automatica basata sul riconoscimento per paragone di immagine (pattern matching). Fino ad allora, l'obiettivo dell'ingegneria di processo era di automatizzare e velocizzare il rilevamento dei difetti di funzionamento delle schede prodotte. Il limite di questo tipo d'ispezione era legato alla raccolta ed all'interpretazione dei dati a posteriori. L'evoluzione della tecnologia e l'aumento della potenza di calcolo dei sistemi elettronici consente oggi di avere acquisizioni ed analisi delle immagini estremamente rapide, permettendo ai sistemi d'ispezione ottica automatica (AOI) di effettuare analisi sempre più fini senza intaccare il tempo di ciclo della linea produttiva. Questa diversa filosofia comporta da un lato un'analisi quantitativa del prodotto ispezionato e dall'altra una elevata velocità di elaborazione delle informazioni acquisite. La capacità di misurare ed archiviare i valori durante l'ispezione consente di creare delle basi di dati statistici migliorando al contempo affidabilità e tracciabilità del processo produttivo; in generale l'AOI costituisce uno strumento per un'analisi oggettiva del processo produttivo. Partendo da questo concetto, risulta così riduttivo considerare l'AOI un sistema in grado semplicemente di intercettare i difetti sulla scheda. Il sistema deve essenzialmente trovare i difetti di processo, andando ad evidenziare quanto la qualità del processo stia deviando dalle condizioni iniziali e predisponendo gli opportuni allarmi, sistemi di monitoraggio in tempo reale sono in grado di fermare la linea produttiva oppure di lanciare un segnale di warning a fronte di uno o più eventi concomitanti: tramite questi è possibile intervenire prima che la deriva di processo diventi drastica e produca una difettosità di funzionamento sulla scheda. Questo costituisce un feedback immediato per l'operatore di linea. L'analisi a posteriori dei dati raccolti permetterà poi al tecnologo di evidenziare i punti deboli della linea produttiva potendo pianificare le eventuali azioni correttive

1.1 Storia

Sebbene esistano precedenti studi e lavori, è non prima del 1970 che gli studi nel settore si sono potuti specializzare, grazie all'aumento delle prestazioni degli elaboratori elettronici finalmente in grado di elaborare grandi quantità di dati quali le immagini.

Negli anni '80 nascono le prime applicazioni pratiche caratterizzate spesso da uno scopo puramente dimostrativo.

Negli anni '90 vediamo comparire i primi frame-grabber standard da inserire su PC e i sistemi di visione acquistano maggiore funzionalità e robustezza abbandonando l'aspetto tipicamente sperimentale del decennio precedente; soprattutto in campo industriale si notano notevoli alti e bassi di questa disciplina caratterizzati da alcune soluzioni funzionali costellate di parecchi insuccessi.

2000 il campo della visione artificiale può essere descritto come vario ed immaturo, la causa va probabilmente ricercata nella sua evoluzione, a cui hanno contribuito diverse discipline scientifiche senza però convenire su una formulazione standard del problema della visione artificiale:

Attualmente non esiste una formulazione standard di come i problemi di visione artificiale vadano risolti. Esistono invece un'abbondanza di metodi atti a risolvere compiti ben definiti, dove le procedure sono spesso dipendenti dal contesto e raramente possono essere estese ad uno spettro più ampio di applicazioni. Molti di questi metodi sono ancora a livello di ricerca base, ma molti altri ancora hanno trovato spazio nella produzione commerciale dove fanno parte di grandi sistemi che risolvono problemi complessi. Nelle applicazioni più pratiche i computer sono pre-addestrati per risolvere un particolare compito, tuttavia diventano sempre più comuni i metodi basati sull'apprendimento.

Dal 2009 vediamo affermarsi l'uso delle telecamere con comunicazione digitale, e standard che uniscono fattori come una discreta velocità, l'economicità, la standardizzazione ed una discreta robustezza in campo industriale. In generale l'affidabilità delle soluzioni migliora come la disponibilità di prodotti COTS (commercial off the shelf) adatti ad un utilizzo in ambito industriale aumenta.

Capitolo 2

Sistemi di imaging

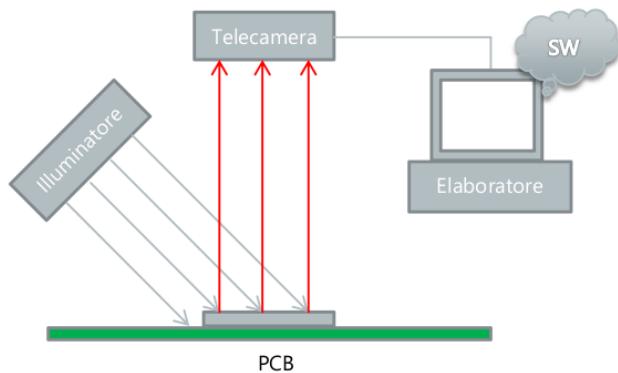


Figura 2.1: Sistema di imaging per l'ispezione automatica

2.1 Sensori

Il cuore di ogni sistema di imaging è il sensore. I moderni sensori sono dispositivi elettronici a stato solido contenenti fino a milioni di siti fotorivelatori discreti chiamati pixel. Due telecamere con lo stesso sensore possono avere prestazioni e proprietà molto differenti a causa della progettazione dell'elettronica di interfaccia. In passato, le telecamere utilizzavano fototubi come *Vidicon* e *Plumbicons* come sensori di immagine. Anche se non sono più utilizzati, il loro segno sulla nomenclatura associata a dimensioni del sensore e il formato rimane a questo giorno. Oggi, quasi tutti i sensori rientrano in una delle due categorie: Charge- Coupled Device (CCD) e Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS).

2.1.1 CCD

Il dispositivo ad accoppiamento di carica (CCD) è stato inventato nel 1969 da scienziati dei Bell Labs nel New Jersey, Stati Uniti d’America. Per anni, è stata la tecnologia prevalente per l’acquisizione di immagini, da astrofotografia digitale a controllo e visione artificiale. Il sensore CCD è un chip di silicio contenente una matrice di siti fotosensibili. Il nome di tale tecnologia si riferisce al metodo con cui i quanti di carica sono spostati sul chip dai siti fotosensibili fino ad un registro a scorrimento, simile alla nozione di *bucket-brigade* (le cariche vengono passate di “secchio in secchio”). Impulsi di clock creano buche di potenziale per spostare quanti di carica sul chip, prima di essere convertito in una tensione da un condensatore. Il sensore CCD è di per sé un dispositivo analogico, ma l’uscita viene immediatamente convertita in un segnale digitale mediante un convertitore analogico-digitale (ADC) *on-chip* o *off-chip*. Nelle fotocamere analogiche, la tensione da ogni sito viene letto in una particolare sequenza, con impulsi di sincronizzazione aggiunti ad un certo punto della catena di segnale per la ricostruzione dell’immagine.

La velocità di acquisizione di questa categoria di sensori è limitata dalla frequenza di trasferimento delle cariche, tuttavia questa tecnologia bilancia questa problematica con un’elevata sensibilità e consistenza *pixel-per-pixel* del CCD. Dal momento che ogni quanto di cariche subisce la stessa conversione di tensione, la resa del CCD è molto uniforme lungo tutti i suoi siti fotosensibili. Il trasferimento di carica porta anche al fenomeno della *blooming*, in cui la carica, da un sito fotosensibile, si riversa ai siti vicini poiché i singoli elementi hanno una capacità finita, ponendo un limite superiore alla gamma dinamica utile del sensore. Questo fenomeno si manifesta come macchie di punti luminosi.

Per compensare la limitata capacità di carica, microlenti sono utilizzate per aumentare il fattore di riempimento o la superficie fotosensibile efficace, per compensare lo spazio sul chip occupata da registri di scorrimento ad accoppiamento di carica. Questo migliora l’efficienza dei pixel, ma aumenta la sensibilità angolare ai raggi di luce in entrata, richiedendo, ai fini di una raccolta efficiente, che colpiscono il sensore con incidenza normale.

2.1.2 CMOS

Il *Complementary metal-oxide semiconductor* (CMOS) è stato inventato nel 1963 da Frank Wanlass, quest’ultimo non ha ricevuto un brevetto per esso fino al 1967. La tecnologia CMOS non è diventata ampiamente utilizzata per applicazioni di *imaging* fino agli anni 1990. In un sensore CMOS, la carica viene convertita in una tensione direttamente sul pixel, il segnale viene multiplexato per riga e colonna multipla sui chip convertitori digitale-analogico (DAC). Inerentemente al suo design, il sensore CMOS è un dispositivo digitale. Ogni sito è essenzialmente un fotodiode e tre transistori che svolgono le funzioni di reset o attivazione del pixel, amplificazione e conversione di carica, selezione o multiplexing (Figura 2). Questo porta all’elevata velocità dei sensori CMOS, ma anche ad una bassa sensibilità e alto rumore a schema fisso, causati di incongruenze di fabbricazione nei sistemi multipli di conversione di carica e digitalizzazione.

Un sensore CMOS è spesso accompagnato da un otturatore a scorrimento elettronico (*rolling shutter*); sebbene, mediante ulteriori transistori nel sito del pixel, un otturatore

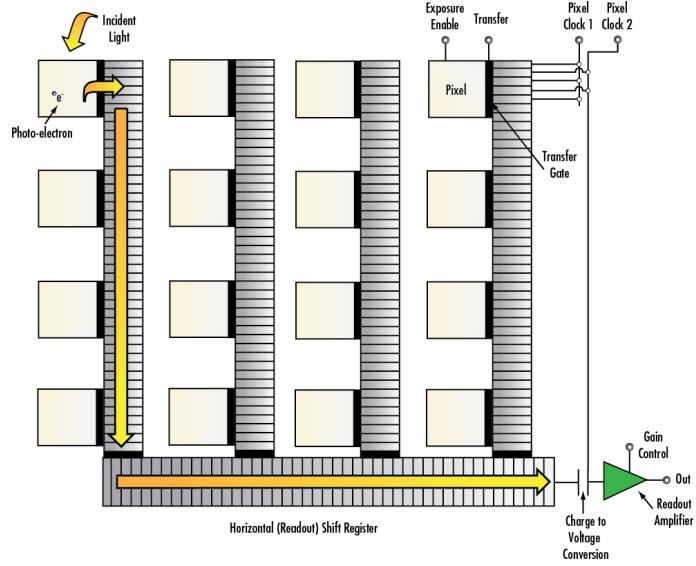


Figura 2.2: Schema a blocchi di un dispositivo CCD

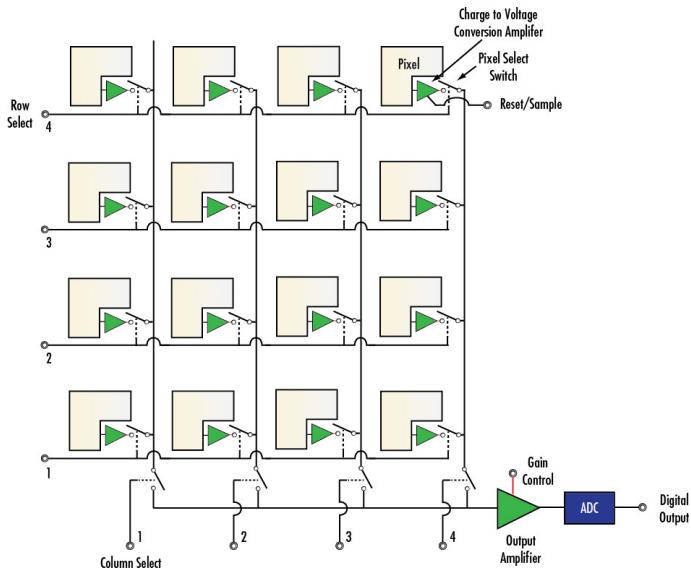


Figura 2.3: Schema a blocchi di un dispositivo CMOS

globale possa essere realizzato permettendo un esposizione simultanea seguita da una lettura sequenziale.

Un ulteriore vantaggio di un sensore CMOS è il suo basso consumo energetico e dissipazione, rispetto ad un sensore CCD equivalente, a causa del minor flusso di carica o corrente. Inoltre, la capacità del sensore CMOS di gestire alti livelli di luce senza *blooming* permette il suo utilizzo in speciali telecamere ad alta gamma dinamica.

Il processo di fabbricazione di un sensore CMOS non consente l'uso di microlenti

sul chip; ciò ne riduce l'efficienza di raccolta rispetto ad un equivalente CCD. Questa bassa efficienza combinata con l'incongruenza *pixel-per-pixel* contribuisce ad un più basso rapporto segnale-rumore e ad una peggiore qualità dell'immagine rispetto ai sensori CCD.

2.1.3 Caratteristiche di un sensore

Pixel

Quando la luce colpisce un sensore di *imaging*, essa viene raccolta da una matrice di piccole buche di potenziale chiamate pixel. L'immagine è, quindi, da composta elementi discreti. L'informazione viene raccolta da questi siti foto sensibili, organizzata, e trasferita. I pixel possono essere costituiti da fotodiodi o fotocapacitori, per esempio, che generano una carica proporzionale alla quantità di luce incidente su quel luogo discreto del sensore, spazialmente limitato. La capacità di un pixel di convertire un fotone incidente è specificata dalla sua efficienza quantica. Ad esempio, se per dieci fotoni incidenti, quattro foto-elettroni vengono prodotti, allora l'efficienza quantica è del 40%. Tipici valori di efficienza quantica per *imager* a stato solido sono nella gamma del 30% - al 60%. L'efficienza quantica dipende dalla lunghezza d'onda e non è necessariamente uniforme. Curve di risposta spettrale spesso specificano l'efficienza quantica in funzione della lunghezza d'onda. Nelle fotocamere digitali, i pixel sono in genere quadrati. Dimensioni dei pixel comuni sono tra 3 - 10 μm . Sebbene per i sensori sia spesso indicato semplicemente il numero di pixel, la dimensione è molto importante per il risultato finale. Pixel grandi sono, in grado di arrivare a saturazione con cariche più alte e di avere un rapporto segnale rumore migliore. Con pixel piccoli il sensore risulta più facile da realizzare anche se il *blooming* peggiora a causa della minor capacità della singola buca abbassando il contrasto sulle frequenze spaziali alte.

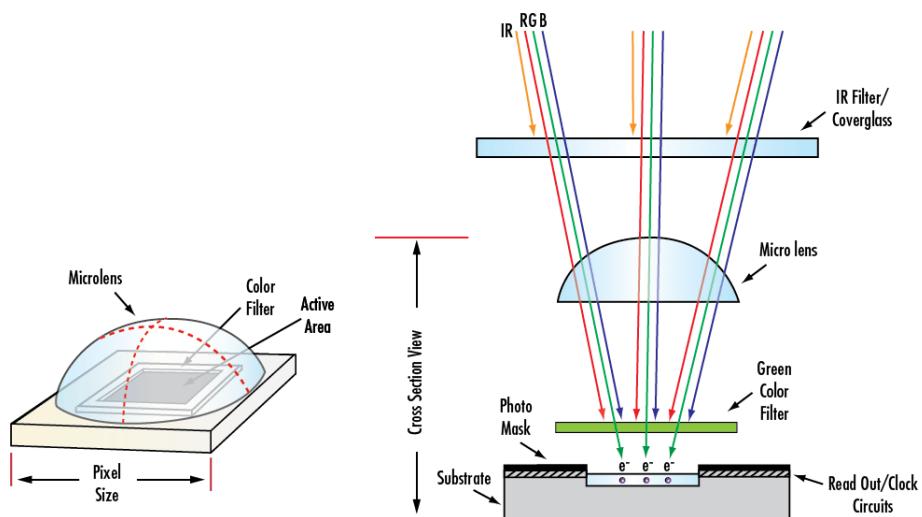


Figura 2.4: Singolo elemento fotosensibile RGB con filtro NIR

Telecamere CCD analogiche hanno pixel rettangolari (più grandi nella dimensione verticale). Questo è il risultato di un numero limitato di linee di scansione nelle norme di segnale (525 linee per NTSC, 625 linee per PAL) a causa di limitazioni di banda. Pixel asimmetrici producono risoluzione orizzontale superiore a quella verticale. Telecamere CCD analogiche (con lo stesso standard del segnale) di solito hanno la stessa risoluzione verticale. Per questo motivo, lo standard industriale di *imaging* è quello di specificare la risoluzione in termini di risoluzione orizzontale.

Dimensione del sensore

Le dimensioni dell'area attiva del sensore è importante per determinare il campo visivo del *Field of View* (FOV). Dato un ingrandimento fisso (determinata dalla lente), sensori più grandi producono maggiori FOV. Ci sono diversi formati standard per sensori matriciali: 1/4", 1/3", 1/2", 1/1.8", 2/3", 1" e 1.2". La nomenclatura di questi standard risale ai tubi a vuoto vidicon utilizzati come *imager* per la trasmissione televisiva, per cui è importante notare che le dimensioni effettive dei sensori differiscono

Un problema che si verifica spesso in applicazioni di *imaging* è la capacità di una lente di illuminare determinate dimensioni di sensore. Se il sensore è troppo grande per la lente, l'immagine risultante può apparire non illuminata uniformemente e l'illuminazione tende ad essere minore verso i bordi a causa dell'effetto vignettatura (estinzione di raggi che attraversano i bordi esterni della lente). Questo è comunemente indicato come l'effetto *tunnel*, dal momento che i bordi del campo diventano scuri. Dimensioni del sensore più piccole non presentano questo fenomeno.

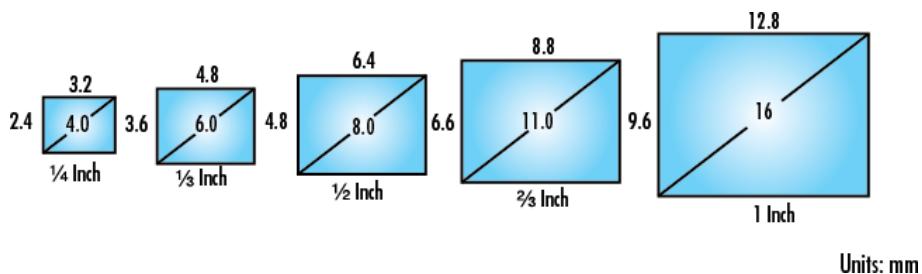


Figura 2.5: Dimensioni sensore

Frame rate e velocità dell'otturatore

Il *frame rate* si riferisce al numero di immagini complete acquisite in un secondo. Nelle applicazioni ad alta velocità è utile scegliere un frame rate più veloce per acquisire più immagini dell'oggetto che si muove attraverso il *field of view*.

La velocità dell'otturatore corrisponde al tempo di esposizione del sensore. Il tempo di esposizione controlla la quantità di luce incidente. Il *blooming* (causato da eccessiva esposizione) può essere controllato diminuendo l'illuminazione o aumentando la velocità dell'otturatore. Aumentare la velocità dell'otturatore può aiutare nella creazione di istantanee di un oggetto dinamico.

A differenza delle telecamere analogiche, in cui nella maggior parte dei casi il *frame rate* è dettato dal display, le fotocamere digitali permettono un frame rate regolabile. Il frame rate massimo per un sistema dipende dalla velocità di lettura del sensore, la velocità di trasferimento dati dell’interfaccia, compreso il cablaggio, e dal numero di pixel (quantità di dati trasferiti per frame). In alcuni casi, una telecamera può acquisire con un frame rate più elevato, riducendo la risoluzione o limitando l’area di interesse. Questo riduce la quantità di dati per frame, consentendo di trasferire più fotogrammi per una data velocità di trasferimento fissa. Con buona approssimazione, il tempo di esposizione è l’ inverso della frequenza di quadro, esiste tuttavia un tempo minimo finito tra le esposizioni (dell’ordine di centinaia di microsecondi) causato dal processo di reset pixel e lettura, questo tempo minimo viene speso sull’elettronica della fotocamera. Molte fotocamere hanno la capacità di leggere la matrice mentre sta già subendo l’esposizione successiva (pipeline);

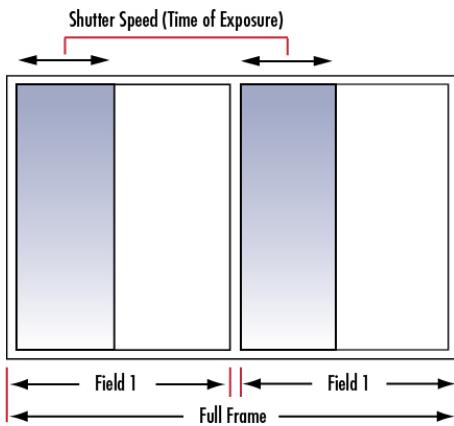


Figura 2.6: Velocità dell’otturatore

Otturatore elettronico

Fino a pochi anni fa, le telecamere CCD utilizzavano otturatori elettronici o globali, e tutte le telecamere CMOS erano limitate a *rolling shutter*. Un otturatore globale è analogo ad un otturatore meccanico dato che tutti i pixel sono esposti e campionati contemporaneamente; la lettura si verifica in sequenza quindi l’acquisizione dei fotoni viene avviata e arresta contemporaneamente per tutti i pixel. D’altra parte, con un *rolling shutter*, l’esposizione, il campionamento e la lettura avvengono in istanti diversi per ogni linea. Intuitivamente, immagini di oggetti in movimento sono distorte da un *rolling shutter*; questo effetto può essere minimizzato con una illuminazione stroboscopica innescata nel momento in cui il periodo di integrazione delle linee sovrappone. L’implementazione di un otturatore globale su dispositivi CMOS richiede un’architettura più complessa rispetto al modello standard *rolling shutter*, si necessita di un transistore e un condensatore supplementare per ogni pixel, ciò consente anche il *pipelining*. Dal momento che la disponibilità di sensori CMOS con otturatore globale è in costante crescita, sia CCD che telecamere CMOS sono utili in applicazioni di movimento ad alta velocità.



Figura 2.7: Otturatore globale e otturatore rolling su soggetto in movimento

2.1.4 Standardizzazione delle interfacce di comunicazione

Le telecamere digitali hanno guadagnato popolarità nell’ultima decade a causa dell’immunità ai disturbi di trasmissione, l’informazione trasmessa non risente di eventuali disturbi e ciò ne ha reso ideale l’applicazione in campo industriale, sono quindi state introdotte sul mercato interfacce e sistemi di interconnessione in maniera similare a quanto effettuato per i *field bus*.

Firewire (IEEE 1394/IIDC DCAM STANDARD)

Firewire è un popolare standard seriale isocrono ed una delle interfacce con la velocità di trasmissione minore. La disponibilità di connessioni *firewire* anche su dispositivi COTS (*Commercial off the shelf*) ne ha garantito la popolarità.

Camera link

Camera link è un interfaccia seriale a velocità elevata sviluppata appositamente per applicazioni di *machine vision*, *automated inspection* e controllo di processo. È in grado di supportare sistemi di visione ad alta risoluzione grazie a bande passanti comprese tra i 255 MB/s, in configurazione base, fino ai 2100MB/s a 15m per applicazioni ad alta velocità.

GigE Vision

GigE Vision è un interfaccia di connessione basata su *Gigabit Ethernet* che utilizza hardware convenzionalmente utilizzato nelle reti informatiche; *switch*, *hubs* possono essere utilizzati per gestire sistemi multi-camera. Punto di forza dei sistemi basati su GigE vision è la standardizzazione dei registri di controllo dei dispositivi di *imaging* tramite lo standard GenICam, ciò permette di sostituire i dispositivi GigE con altri equivalenti senza dover riscrivere il software di controllo. Il protocollo *Precision Time Protocol* (PTP) può essere utilizzato per sincronizzare i clock di dispositivi di *imaging* connessi alla stessa rete creando quindi dei rapporti fissi di ritardo tra l’esposizione di ogni dispositivo, consentendo di realizzare sistemi multi-camera ad alta risoluzione aggregando più sensori matriciali

USB

USB è un interfaccia disponibile su ogni moderno personal computer. Purtroppo la banda disponibile non è sufficiente a supportare dispositivi di *imaging* ad alta risoluzione, l'avvento di USB3.0 ha portato alla commercializzazione di dispositivi per applicazione industriale e successivamente alla creazione dello standard USBVision simile al precedentemente descritto GigE Vision/GenICam

2.2 Richiami di ottica

Il comportamento dei raggi di luce viene descritto dalla cosiddetta *ottica geometrica*. L'ottica geometrica è solo una approssimazione del comportamento della luce, che viene descritto completamente dall'ottica ondulatoria, ma una approssimazione che è in grado di descrivere la maggior parte dei fenomeni. Nell'ottica geometrica, la luce è formata da raggi che si propagano in linea retta in un mezzo. Ogni mezzo è caratterizzato da un numero chiamato indice di rifrazione (n). L'indice di rifrazione dipende dalla composizione e dalla densità del mezzo. Nella tabella 2.1 sono riportati gli indici di rifrazione di alcuni mezzi.



Figura 2.8: Riflessione e rifrazione

Quando i raggi incontrano una superficie che separa due mezzi con diversi indici di rifrazione (ad esempio aria e vetro, oppure aria ed acqua, o anche due vetri diversi), il comportamento dei raggi di luce è regolato da due leggi fondamentali:

1. Nella riflessione (Figura 2.8 – a) il raggio di luce (detto incidente) dà origine ad un raggio riflesso. L'angolo incidente è uguale all'angolo riflesso misurato rispetto alla perpendicolare della superficie. La riflessione avviene in modo pressoché completo solo in alcuni casi, di solito quando si ha a che fare con una superficie metallica.
2. Nella rifrazione (Figura 2.8 – b) il raggio di luce incidente dà origine a un raggio rifratto. Anche qui consideriamo gli angoli rispetto alla perpendicolare della superficie, e la loro relazione è regolata dalla cosiddetta legge di Snell.

2.2.1 Rifrazione - legge di Snell

La rifrazione è la deviazione subita da un'onda che ha luogo quando questa passa da un mezzo ad un altro nel quale la sua velocità di propagazione cambia. La legge di

Mezzo	Indice di rifrazione (n)
Vuoto	1
Aria	1,00029
Acqua	1,333
Plexiglas	1,49
Vetro crown	1,51-1,61
Vetro flint	1,51-1,89
Diamante	2,417

Tabella 2.1: Indici di rifrazione

Snell, nota anche come legge di Descartes o legge di Snell-Descartes (o legge di Cartesio o legge di Snell-Cartesio), descrive le modalità di rifrazione di un raggio luminoso nella transizione tra due mezzi con indice di rifrazione diverso, e deriva dall'equazione iconale. La figura 2.9 mostra due mezzi trasmissivi con indice di rifrazione n_1 (a sinistra) e n_2 (a destra) in contatto tra loro attraverso una superficie, che viene chiamata interfaccia (linea verticale in figura). Nel caso $n_2 > n_1$, la luce ha una velocità di fase più bassa nel secondo mezzo. Il raggio luminoso PO proveniente dal mezzo di sinistra colpisce l'interfaccia nel punto O . A partire da tale punto O tracciamo una retta perpendicolare all'interfaccia stessa, che viene chiamata normale all'interfaccia (linea orizzontale in figura). L'angolo tra la normale e il raggio luminoso PO viene chiamato angolo d'incidenza, θ_1 . Il raggio attraversa l'interfaccia e prosegue nel mezzo di destra, indicato come OQ . L'angolo che tale raggio (rifratto) forma con la normale si chiama angolo di rifrazione, θ_2 . La legge di Snell fornisce la relazione tra gli angoli θ_1 e θ_2 :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

Si noti che nel caso $\theta_1 = 0^\circ$ (ovvero il raggio risulta perpendicolare all'interfaccia) la soluzione è $\theta_2 = 0^\circ$ per qualunque valore di n_1 e n_2 . In altri termini, un raggio che entra in un mezzo in modo perpendicolare alla sua superficie non viene mai deviato. Quanto detto sopra vale anche nel caso di un raggio luminoso che passa da un mezzo più denso a uno meno denso; la simmetria della legge di Snell mostra che gli stessi percorsi luminosi sono validi anche nella direzione opposta. Una regola di carattere qualitativo per determinare la direzione della rifrazione è che il raggio luminoso è sempre più vicino alla normale dal lato del mezzo più denso. La legge di Snell è valida in generale solo per mezzi isotropi, come il vetro. Nel caso di mezzi anisotropi (ad esempio alcuni cristalli) il fenomeno della birifrangenza può dividere in due il raggio rifratto. Si vengono allora ad avere due raggi, uno ordinario (raggio o) che segue la legge di Snell, e uno straordinario (raggio e) che può non essere complanare con quello incidente.

2.2.2 Riflessione

La riflessione è il fenomeno per cui un'onda, che si propaga lungo l'interfaccia tra differenti mezzi, cambia di direzione a causa di un impatto con un materiale riflettente. Assorbimento, riflessione e trasmissione sono i fenomeni che avvengono quando la luce interagisce con

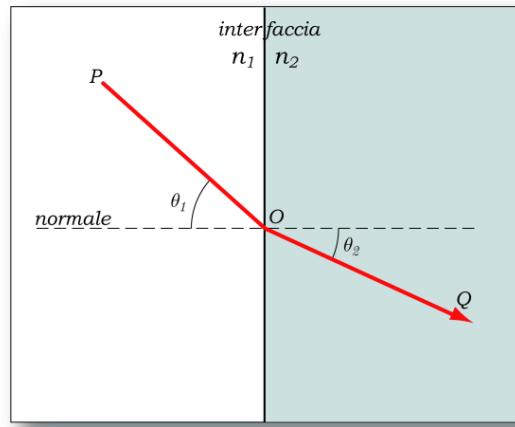
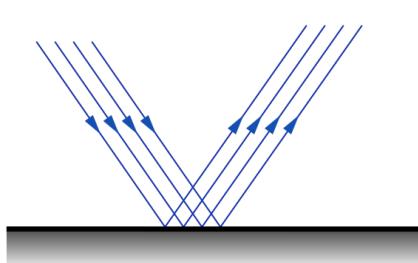


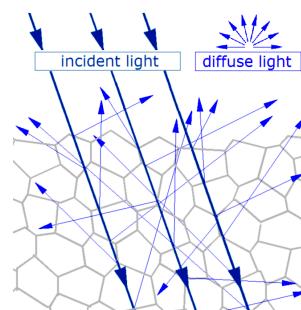
Figura 2.9: Rifrazione

la materia. Quando l'energia radiante incide su un corpo, una parte viene assorbita, una parte viene riflessa e una parte viene trasmessa. Per la legge di conservazione dell'energia, la somma delle quantità di energia rispettivamente assorbita, riflessa e trasmessa è uguale alla quantità di energia incidente. Per indicare il tipo di riflessione di cui si tratta si usano gli aggettivi:

- Spettrale: per indicare la radiazione monocromatica, cioè considerata lunghezza d'onda per lunghezza d'onda;
- Radiante (contrapposto a luminosa): per indicare che la radiazione è data in termini di energia totale, cioè è espressa mediante grandezze radiometriche;
- Luminosa (contrapposto a radiante): per indicare che la radiazione è pesata secondo la funzione di efficienza luminosa dell'occhio, cioè è espressa in grandezze fotometriche;



(a) Riflessione Speculare



(b) Riflessione Diffusa

La riflessione può avvenire:

- Specularmente (riflessione speculare o regolare) cioè in una unica (o quasi) direzione
- Diffusamente (riflessione diffusa) cioè in varie direzioni;

La riflettanza (reflectance) è il rapporto tra flusso riflesso e flusso incidente valutato per ogni lunghezza d'onda. Essendo definita come rapporto di grandezze omogenee, la riflettanza è una grandezza adimensionale e viene espressa in percentuale (0-100%) o come fattore (0.0-1.0). Inoltre riguarda il flusso e quindi la totalità della radiazione riflessa nella emisfera. La riflettanza non è solo funzione della lunghezza d'onda ma anche dell'illuminazione, della geometria di irradimento e della geometria di visione (cioè della geometria con cui si illumina il corpo e della geometria con cui si misura la quantità riflessa), per cui è necessario definire una grandezza più generale della riflettanza, cioè il fattore di riflessione. Si fa riferimento al diffusore riflettente ideale. Si tratta di un corpo (ideale, cioè teorico) che non assorbe e non trasmette, ma riflette diffusamente la radiazione ricevuta con radianza o luminanza uguale per ogni angolo di riflessione e indipendentemente dalla direzione della radiazione incidente. Come prima applicazione del concetto di diffusore riflettente ideale si definisce il fattore di radianza (radiance factor) o il fattore di luminanza (luminance factor) come il rapporto tra la radianza di un'area e quella del diffusore ideale riflettente irradiato nello stesso modo. Con riferimento a questo corpo ideale, il fattore di riflessione (reflectance factor o reflection factor) di un corpo è il rapporto tra il flusso riflesso dal corpo, in un dato cono il cui vertice è sul corpo considerato, e il flusso riflesso dal diffusore riflettente ideale. Il fattore di riflessione è dunque una grandezza generica che corrisponde alla riflettanza spettrale se il cono è una emisfera, al fattore di radianza spettrale se il cono è stretto. Un tipico spettrofotometro è in grado di misurare il fattore di riflessione spettrale ad intervalli di 10 nm nell'intervallo da 380 a 730 nm. La riflessione di onde elettromagnetiche è regolata da due leggi fondamentali, ricavabili dal principio di Fermat e dal principio di Huygens-Fresnel:

- Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale al piano nel punto di incidenza giacciono sullo stesso piano;
- L'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali;

Un'onda elettromagnetica riflessa può subire uno sfasamento. Questo dipende dagli indici di rifrazione del mezzo nel quale viaggia la luce (n_1) e del mezzo oltre la superficie riflettente (n_2):

se $n_1 > n_2$ non c'è sfasamento;

se $n_1 < n_2$ la radiazione riflessa è sfasata di π , cioè di mezza lunghezza d'onda.

2.2.3 Lenti

Una lente è un elemento ottico che ha la proprietà di concentrare o di far divergere i raggi di luce. Grazie a questa proprietà può formare immagini, reali o *virtuali*, di oggetti. Normalmente è realizzata in vetro o materiali plastici. Esistono anche dispositivi analoghi, che operano su altre bande dello spettro elettromagnetico o altre forme di radiazione, comunque chiamati lenti.

Una lente convergente (Figura 2.11 – a) sfrutta la rifrazione per convogliare i raggi provenienti da un punto oggetto in un altro punto detto fuoco. Le superfici sono opportunamente sagomate, solitamente in forma sferica, per raggiungere questo scopo. Il risultato è la creazione di una immagine i cui punti corrispondono ai punti dell'oggetto osservato (Figura 2.12 – a). L'immagine può essere osservata su uno schermo posto sul suo piano, oppure raccolta con una pellicola o anche osservata ad occhio nudo. Se l'oggetto si trova all'infinito, come nel caso di un oggetto astronomico, la distanza tra la lente e l'immagine (d_2) è pari alla lunghezza focale. Altrimenti vale la formula:

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$$

dove d_1 è la distanza tra l'oggetto e la lente, d_2 è la distanza tra la lente e l'immagine e f è la lunghezza focale.

In una lente divergente (Figura 2.11 – b), i raggi di luce non convergono, ma se li prolunghiamo dalla parte della lente troviamo che si radunano comunque in un punto, che chiamiamo fuoco virtuale. In questo modo si forma (Figura 2.12 – b) una immagine virtuale, che può essere osservata guardando attraverso la lente, ma che non può essere raccolta su uno schermo.

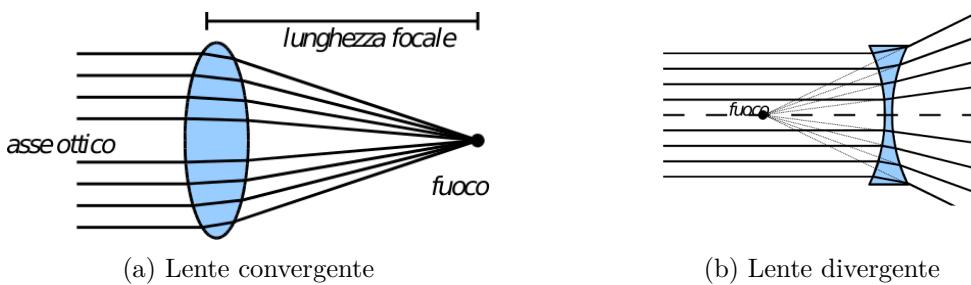


Figura 2.11: Lenti

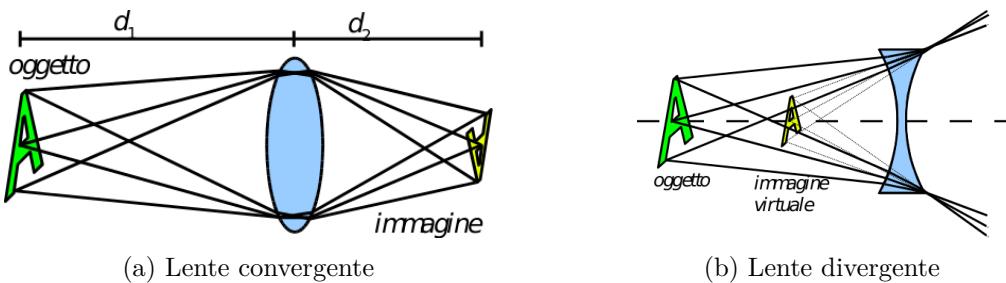


Figura 2.12: Formazione dell'immagine

2.2.4 Gli specchi

Uno specchio è formato da un substrato di vetro o altro materiale su cui viene depositato un sottile strato di alluminio seguito da altre sostanze per incrementarne la resistenza

o la riflettività. Lo specchio più semplice è quello sferico, tuttavia usato per osservare oggetti a grande distanza presenta il difetto detto aberrazione sferica, i raggi riflessi nelle zone periferiche dello specchio vengono focalizzati più vicino rispetto a quelli riflessi nelle zone centrali (Figura 2.13 – a). Lo specchio può essere anche un paraboloido (Figura 2.13 – b), nel qual caso lo specchio viene detto parabolico. L'aberrazione sferica può essere corretta utilizzando un sistema complesso di specchi o di specchi e lenti, in cui l'aberrazione introdotta da un componente viene corretta dagli altri. Come per una lente, anche per uno specchio viene definita una lunghezza focale che corrisponde alla distanza tra il centro dello specchio e il fuoco.

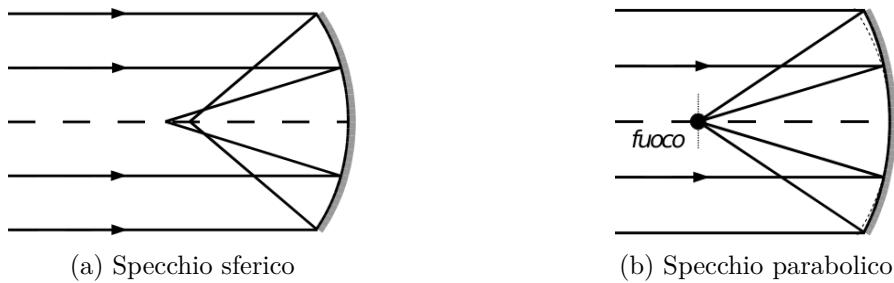


Figura 2.13: Specchi

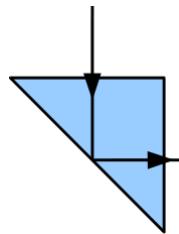


Figura 2.14: Prisma diagonale

2.2.5 Approssimazione parassiale

Nell'ottica geometrica si può applicare l'approssimazione parassiale quando tutti i raggi che entrano o escono da un sistema ottico centrato si propagano dal piano oggetto al piano immagine ad angoli piccoli rispetto all'asse del sistema, rimanendo quindi confinati in una regione prossima all'asse ottico ("parassiale"). In questo caso, si dice che il sistema ottico forma l'immagine dell'oggetto in condizioni parassiali.

In approssimazione parassiale nella legge di Snell si può approssimare il seno con il suo argomento (e il coseno con 1) dato che gli angoli di incidenza, di riflessione e di rifrazione sono piccoli.

Una lente sferica semplice dà un'immagine (monocromatica) correttamente messa a fuoco, reale o virtuale, solo se è in condizioni parassiali, cioè se l'oggetto è visto con un angolo piccolo e se il diametro della lente è piccolo rispetto alla distanza focale e alla distanza dell'oggetto. Al crescere degli angoli nascono aberrazioni.

2.2.6 Aberrazione

L'aberrazione di un sistema ottico è la differenza tra l'immagine effettiva, reale o virtuale, formata dal sistema e l'immagine che si voleva ottenere, immagine che di solito è bidimensionale e consiste in una proiezione geometrica della scena reale sul piano focale del sistema secondo i principi dell'ottica geometrica ideale. Le aberrazioni possono dare scarsa nitidezza, deformazioni dell'immagine, differenze tra le immagini corrispondenti ai diversi colori, non uniformità della luminosità.

In particolare, si chiamano aberrazioni le differenze di un'immagine rispetto a quella previste in approssimazione parassiale. Si distinguono le aberrazioni policromatiche, dovute alla dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda della luce, da quelle monocromatiche.

Le aberrazioni ricadono in due classi:

- Monocromatiche: causate dalla geometria delle lenti o degli specchi, si verificano sia quando la luce è riflessa, sia quando è rifratta, si verificano anche utilizzando luce monocromatica (il cui contenuto è un'unica lunghezza d'onda).
- Cromatiche: sono causate dalla dispersione, la variazione dell'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda, non si verificano in caso di luce monocromatica.

Consideriamo adesso alcune aberrazioni partendo dalle leggi di Snell:

$$\sin(\theta_1) = \frac{n_2}{n_1} \sin(\theta_2)$$

e avvalendoci di uno sviluppo consideriamo una teoria del terzo ordine:

$$\sin(\theta) \simeq \theta - \frac{\theta^3}{3}$$

In questo caso si identificano 5 aberrazioni monocromatiche:

1. Aberrazione sferica
2. Coma
3. Astigmatismo
4. Curvatura di campo
5. Distorsione

2.2.7 Aberrazione Sferica

L'aberrazione sferica è propria dei sistemi ottici con lenti sferiche. Questo tipo di aberrazione è provocato dal fatto che la sfera non è la superficie ideale per realizzare una lente, ma è comunemente usata per semplicità costruttiva. I raggi distanti dall'asse vengono focalizzati ad una distanza differente dalla lente rispetto a quelli più centrali. Per evitare

il fenomeno si utilizzano particolari lenti non sferiche, chiamate asferiche, più complesse da realizzare e molto costose. Il difetto può anche essere minimizzato scegliendo opportunamente il tipo di lente adatto all'impiego specifico; per esempio una lente piano-convessa è adatta per focalizzare un fascio collimato a formare un punto preciso, se usata con il lato convesso rivolto verso il fascio.

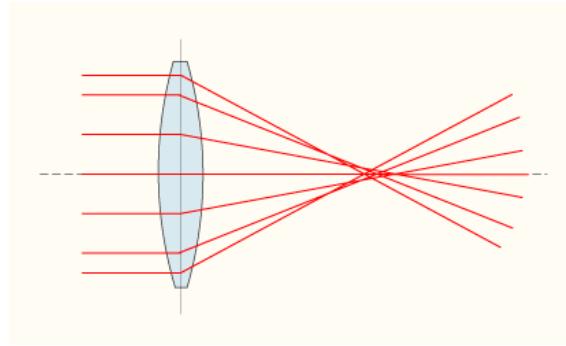


Figura 2.15: Aberrazione sferica

2.2.8 Coma

La coma è un'aberrazione ottica che deriva il suo nome dal caratteristico aspetto a cometa delle immagini create dai sistemi ottici che presentano tale difetto. La coma si ha quando l'oggetto ripreso è spostato lateralmente rispetto all'asse del sistema di un angolo θ . I raggi che passano per il centro di una lente con distanza focale f , sono focalizzati alla distanza $f \tan(\theta)$. I raggi che passano in periferia sono focalizzati invece in un punto diverso sull'asse, più lontano nel caso della coma positiva e più vicino nella coma negativa. In generale, un fascio di raggi passanti per la lente ad una certa distanza dal centro, è focalizzato in una forma ad anello sul piano focale. La sovrapposizione di questi diversi anelli origina una forma a V, simile alla coda di una cometa (da cui il nome: in Latino coma = chioma). Come per l'aberrazione sferica, la coma può essere ridotta (e in alcuni casi eliminata) scegliendo opportunamente la curvatura delle lenti in funzione dell'uso.

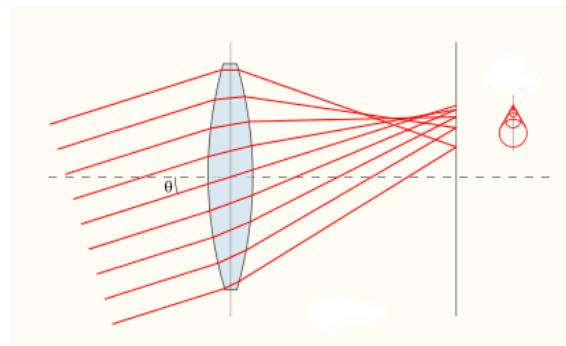


Figura 2.16: Coma

2.2.9 Astigmatismo

L'astigmatismo è un'aberrazione ottica presente in un sistema singolo o composto di lenti, dagli obiettivi all'occhio; i raggi che si propagano in due piani intersecanti l'asse ottico ad angoli diversi, ad esempio perpendicolari tra loro, hanno fuochi differenti e proiettando l'immagine di un punto, lo stesso risulta deformato. Se un sistema ottico con astigmatismo viene utilizzato per formare l'immagine di una croce, le linee orizzontali e verticali saranno a fuoco a due distanze diverse. Visivamente un'immagine prodotta da un sistema astigmatico apparirà più o meno evidentemente deformata (un punto risulterà ellittico, con parte del bordo sfocato) o sdoppiata, con un'immagine principale a fuoco ed una secondaria, meno incisa, sfocata e traslata rispetto a quella principale, a renderne meno intelligibile la lettura. L'aberrazione colpisce potenzialmente tutti i sistemi ottici ed è particolarmente sentita nei telescopi rifrattivi e nei microscopi per l'importanza estrema del dettaglio.

L'astigmatismo assiale e sagittale costituisce una delle cinque aberrazioni primarie di Seidel o aberrazioni primarie monocromatiche. Sul piano di Gauss la figura descritta dalle equazioni di Seidel per l'aberrazione astigmatica e di curvatura di campo (un sistema di equazioni in genere espresse in coordinate polari) è un'ellisse parametrizzata da fattori tra cui i coefficienti di aberrazione che modificano le sue dimensioni (entità dell'aberrazione) e la sua forma. Quando La curvatura di campo è uguale a 0 si ha l'astigmatismo sagittale puro, nel caso opposto si ha l'astigmatismo tangenziale.

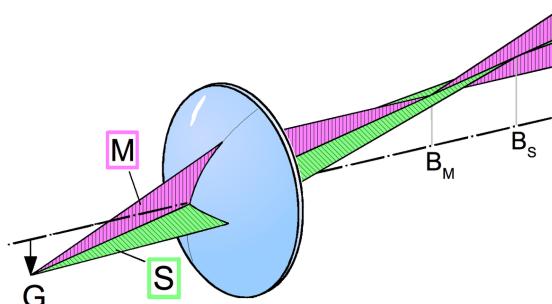


Figura 2.17: Astigmatismo

2.2.10 Curvatura di campo

La curvatura di campo è un'aberrazione monocromatica extra assiale coniugata all'astigmatismo dei fasci obliqui. Nonostante l'eliminazione dell'astigmatismo dei fasci obliqui, l'immagine di un oggetto piano, che sia perpendicolare all'asse ottico, si forma comunque su una superficie curva, la superficie di Petzval. La deviazione indotta dal piano immagine viene quindi definita curvatura di campo.

2.2.11 Distorsione

In ottica geometrica la distorsione è la deviazione da una proiezione rettilinea, ovvero, una proiezione in cui le rette nella scena rimangono rette nel piano dell'immagine. Nonostante

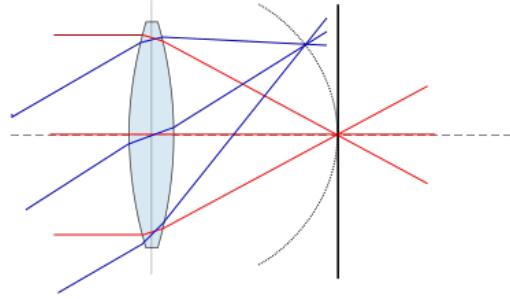
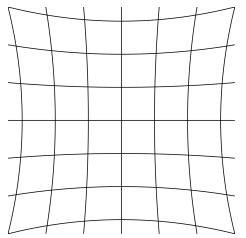


Figura 2.18: Curvatura di campo

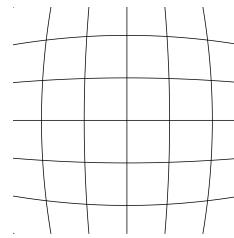
la distorsione possa essere irregolare, la condizione che si verifica più frequente è la distorsione radiale simmetrica, solitamente le distorsioni vengono classificate come *a cuscino*, *a barile*.

Distorsione a cuscino: L’ingrandimento dell’immagine cresce con la distanza dall’asse ottico, l’effetto visibile è che le linee che non passano per il centro dell’immagine sono piegate verso il centro dell’immagine.

Distorsione a barile: L’ingrandimento diminuisce con la distanza dall’asse ottico, l’effetto apparente è che l’immagine sembra mappata su di una sfera, lenti grandangolari utilizzano questo tipo di distorsione per mappare un oggetto infinitamente largo in un area finita.



(a) Cuscino



(b) Barile

Figura 2.19: Distorsione

Essendo la distorsione radiale principalmente dominata da componenti radiali di basso ordine, possono essere corrette usando il modello di distorsione di Brown; quest’ultimo corregge sia le distorsioni radiali che quelle tangenziali causate dall’impreciso allineamento delle lenti[4].

$$x_d = x_u(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_2(r^2 + 2x_u^2) + 2P_1 x_u y_u)(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 \dots)$$

$$y_d = y_u(1 + K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots) + (P_1(r^2 + 2y_u^2) + 2P_2 x_u y_u)(1 + P_3 r^2 + P_4 r^4 \dots)$$

- (x_d, y_d) Punti distorti proiettati sul piano immagine;
- (x_u, y_u) Punti non distorti proiettati da una camera pinhole ideale;
- (x_c, y_c) Centro di distorsione;
- $K_n = n^{\text{th}}$ Coefficienti di distorsione radiale;
- $P_n = n^{\text{th}}$ Coefficienti di distorsione tangenziale;
- $r = \sqrt{(x_u - x_c)^2 + (y_u - y_c)^2}$

2.2.12 Aberrazione cromatica

Una lente singola non è soddisfacente come obiettivo perché l'indice di rifrazione, da cui dipende la lunghezza focale, è diverso a seconda della lunghezza d'onda della luce, cioè del suo colore. In pratica, la luce rossa viene focalizzata più lontano, la luce blu più vicino, e quindi non c'è un ben definito piano dell'immagine (Figura 2.20). Tale caratteristica del vetro è definita dispersione ed è sempre presente, anche se in modo diverso da vetro a vetro. La soluzione a questo problema sta nel combinare due lenti di vetri diversi, scelti in modo che il risultato porti a una compensazione. Di solito si combina una lente convergente con bassa dispersione (vetro crown) con una lente divergente con alta dispersione (vetro flint). Il sistema rimane sempre convergente, perché la lente divergente è meno potente di quella convergente, tuttavia la sua maggior dispersione compensa quella di verso opposto introdotta dalla lente convergente. Questa combinazione viene detta doppietto acromatico (Figura 2.21). La correzione, per quanto buona, non è perfetta, e può essere migliorata usando vetri speciali molto costosi in combinazioni di due lenti (doppietti) o tre (tripletti). In tal caso gli obiettivi vengono detti apocromatici.

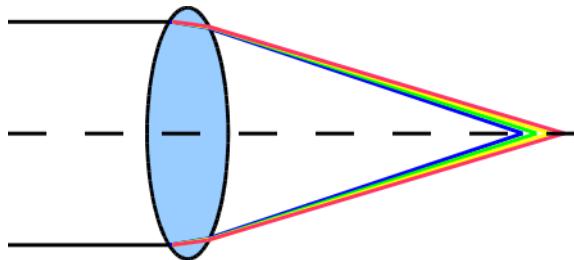


Figura 2.20: Aberrazione cromatica

2.2.13 Ingrandimento e luminosità

La dimensione dell'immagine formata nel piano focale dipende dalla lunghezza focale e, ovviamente, dalla dimensione dell'oggetto che si osserva. Se l'angolo sotteso dall'oggetto è θ , allora la dimensione sul piano focale è:

$$l = f \tan(\theta)$$

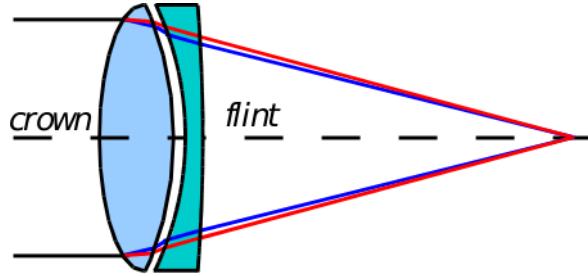


Figura 2.21: Doppietto acromatico

Per piccoli angoli la tangente si può approssimare con l'argomento

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \tan(\theta) = \theta$$

quindi

$$l \simeq f \cdot \theta$$

La quantità di luce raccolta da un obiettivo, dipende dalla sua area, cioè da

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$$

dove d è il diametro dell'obiettivo. Se puntiamo un obiettivo contro un oggetto esteso la quantità di luce raccolta sarà proporzionale a d^2 , ma l'ingrandimento farà sì che questa luce venga sparsa su un'area proporzionale al quadrato della lunghezza focale f^2 .

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{f} \right)^2$$

Quindi la luminosità superficiale dell'immagine sarà proporzionale a $\left(\frac{d}{f} \right)^2$

Il rapporto

$$f/\# = \frac{f}{d}$$

viene chiamato rapporto focale ed indica la luminosità di un obiettivo (telescopico o fotografico).

Ad esempio, un telescopio da 100 mm di diametro e 1000 mm di focale ha un rapporto f/d pari a 10 (indicato con 1 : 10, oppure $f/10$). Un telescopio da 100 mm di diametro e 500 mm di focale, invece, ha un rapporto f/d pari a 5 (indicato con 1 : 5 oppure $f/5$), ed è più luminoso, cioè l'immagine sul piano focale avrà una luminosità superficiale più alta.

2.3 Illuminazione

È ampiamente riconosciuto che l'appropriatezza dell'illuminazione e la qualità della stessa siano aspetti critici nella creazione di un sistema di visione pronto e robusto [10]. Progettare un ambiente di analisi robusto massimizzerà la riuscita del progetto in termini di tempo, sforzo e risorse impiegate.

Storicamente, la luce è stata sempre l'ultimo aspetto ad essere specificato, sviluppato o finanziato, questo tipo di approccio derivava principalmente dall'assenza di prodotti commerciali espressamente rivolti alla *machine vision*, ciò portava all'adozione di prodotti *consumer* quali lampade a incandescenza e/o fluorescenza.

Ciò che è realmente richiesto per la realizzazione di sistemi di ispezione industriale è il controllo dell'illuminazione volto a produrre:

- Illuminazione appropriata dei campioni da analizzare;
- Standardizzazione delle componenti, tecniche, implementazioni e utilizzo del sistema di illuminazione;
- Riproducibilità dei risultati delle ispezioni;
- Robustezza delle ispezioni a variazioni dell'ambiente di ispezione;

2.3.1 Illuminazione direzionale

Un illuminatore direzionale è costituito da una o più sorgenti di luce puntiforme che proiettano luce direzionale sulla parte da ispezionare, utilizzando questa tipologia di illuminatore è possibile ispezionare superfici piane non riflettenti poiché la luce raggiunge il sensore in maniera consistente.

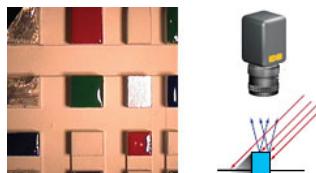


Figura 2.22: Illuminazione direzionale

Pro: Luminosità, flessibilità di installazione.

Contro: Generazione di ombre e riflessi dovuti ad altri oggetti presenti sulla scena

2.3.2 Illuminazione tangenziale

Un illuminatore tangenziale è costituito da una o più sorgente di luce direzionale aventi un elevato angolo di incidenza rispetto alla parte da ispezionare, ciò li rende adatti ad evidenziare difetti superficiali dell'oggetto che appaiono evidenziati sull'immagine. Tale metodologia è applicata con successo all'ispezione di componenti marcati con tecnologia DPM (Direct Part Marking) laser poiché la superficie incisa risulta evidenziata da questo tipo di illuminatore

Pro: Evidenziamento della struttura superficiale dell'oggetto da ispezionare.

Contro: Punti luminosi ed eccessiva generazione di ombre

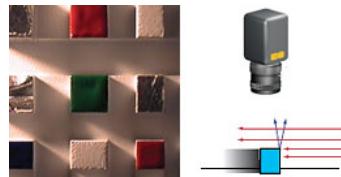


Figura 2.23: Illuminazione tangenziale

2.3.3 Illuminazione diffusa

Un illuminatore diffuso è costituito da sorgente di luce diffusa ed estesa ciò li rende adatti nell’ispezione di parti che potrebbero creare riflessi illuminando in maniera omogenea e consistente l’area di ispezione. Tali illuminatori sono, tuttavia, di difficile impiego in contesti dove gli ingombri sono ridotti per via delle loro grandi dimensioni (una sorgente di luce diffusa viene realizzata posizionando sorgenti di luce puntiforme lontano dall’area di ispezione)

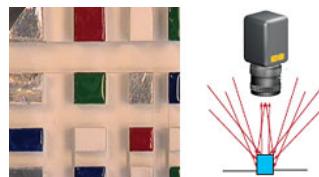


Figura 2.24: Illuminazione diffusa

- Pro: Riduce al minimo i riflessi e provvede ad un illuminazione uniforme.
 Contro: Grandi dimensioni, difficoltà di realizzazione

2.3.4 Illuminazione anulare

Un illuminatore anulare è costituito da più sorgenti di luce puntiformi disposte coassialmente al dispositivo di *imaging*, ciò li rende adatti ad un ispezione simile a quelle possibili per mezzo di luce diffusa ma ne limita l’area ispezionata e la distanza di esercizio. Tale tipologia di illuminazione produce inoltre fastidiosi riflessi circolari (rumore)

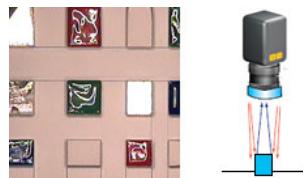


Figura 2.25: Illuminazione anulare

- Pro: Il montaggio avviene direttamente sulle lenti, garantisce illuminazione diffusa alla giusta distanza di esercizio.
- Contro: Distanze di impiego limitate, riflessi circolari su superfici riflettenti.

2.3.5 Illuminazione diffusa assiale

Un illuminatore diffuso assiale è costituito da una sorgente di luce puntiforme direzionale orientata perpendicolarmente all'oggetto da ispezionare, tale luce colpisce un *beam splitter* riflettendosi prima sulla parte da ispezionare e poi sul dispositivo di *imaging*; ciò crea una luce diffusa senza riflessi circolari, ma gli ingombri di questi sistemi e la distanza di esercizio limitata ne vincolano l'utilizzo.



Figura 2.26: Illuminazione diffusa assiale

- Pro: Illuminazione uniforme, riduzione delle ombre, pochi riflessi
- Contro: Dimensioni elevate, difficile montaggio, bassa efficienza.

2.3.6 Illuminazione strutturata

Un illuminatore a luce strutturata è costituito da una sorgente che proietta *pattern* geometrici quali linee, punti, griglie o cerchi. Tale struttura della luce può evidenziare curvature o altri difetti dei materiali o essere utile per effettuare misure basate sulla distorsione dei motivi proiettati.



Figura 2.27: Illuminazione strutturata

- Pro: Genera un'elevata luminosità su piccole aree di interesse, possibilità di misurare la profondità.
- Contro: Può causare riflessi ed è assorbita da alcuni colori.

2.3.7 Illuminazione polarizzata

Un illuminatore polarizzato è costituito da una sorgente di luce polarizzata e di un analizzatore (montato sul sensore), ciò permette di eliminare selettivamente riflessi provenienti da specifiche direzioni.

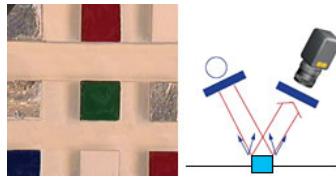


Figura 2.28: Illuminazione polarizzata

Pro: Genera una superficie con illuminazione uniforme e con riflessi ridotti.

Contro: Diminuisce l'efficienza del sistema di illuminazione.

2.3.8 Illuminazione dark-field

Un illuminatore *dark-field* è costituito da una sorgente direzionale di luce posizionata perpendicolarmente alla lente; la luce penetra così un oggetto traslucente attraverso i bordi

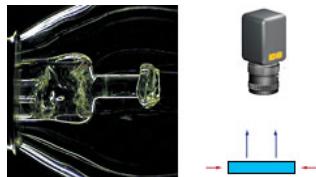


Figura 2.29: Illuminazione dark-field

Pro: Altissimo contrasto sui dettagli interni e superficiali. Esalta graffi crepe e bolle in oggetti trasparenti

Contro: Basso contrasto sui bordi, non funziona su oggetti opachi.

2.3.9 Retroilluminazione (bright-field).

Un illuminatore *bright-field* è costituito da una sorgente di luce posta sul retro dell'oggetto da ispezionare, ciò può essere utile per evidenziarne i contorni a scopo di misura o per osservare dettagli in un oggetto trasparente

Pro: Alto contrasto per il rilevamento dei bordi.

Contro: Elimina i dettagli superficiali.

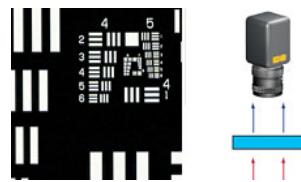


Figura 2.30: Illuminazione brightfield

2.4 Lenti

Tutte le lenti obbediscono alla legge di Snell sulla rifrazione, di conseguenza la geometria della lente determina il modo in cui la luce si propaga attraverso gli elementi ottici. Stabiliremo ora un glossario con la terminologia e introdurremo diverse geometrie di lenti.

2.4.1 Terminologia

- D Diametro – Dimensione fisica della lente.
- R Raggio di curvatura – La distanza diretta tra il vertice di una superficie e il centro di curvatura.
- EFL Lunghezza focale effettiva – Distanza ottica tra il piano principale di un'ottica e il piano immagine.
- BFL Lunghezza focale posteriore – Distanza meccanica tra l'ultima superficie della lente ed il piano immagine.
- P, P' Piano Principale – Piano ipotetico dove i raggi di luce incidenti si piegano a causa del fenomeno della rifrazione.
- CT Spessore centrale – la distanza tra il piano principale e la fine dell'elemento.
- db Diametro di ingresso del raggio – Diametro di un raggio collimato in ingresso.
- dr Diametro di uscita del raggio – Diametro di un anello luminoso in uscita all'elemento.
- L Lunghezza distanza effettiva fra le superfici di un elemento.

2.4.2 Plano Convex

Ideale per la collimazione o focalizzazione, utilizzando luce monocromatica.

2.4.3 Double Convex

Ideale per l'inoltro di immagini , e per l'*imaging* di oggetti vicini.

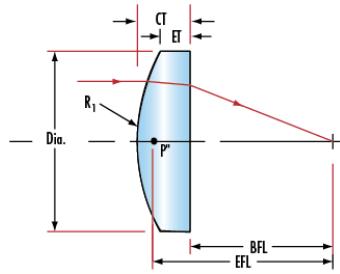


Figura 2.31: Lente Plano-Convex

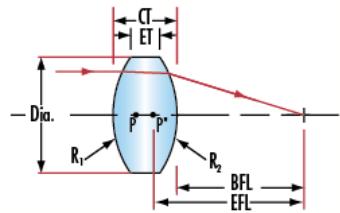


Figura 2.32: Lente Double Convex

2.4.4 Plano Concave

Composta da una superficie piatta e una superficie curva verso l'interno. Ideale per l'espansione di fasci, proiezione di luce, ed espansione della lunghezza focale del sistema ottico .

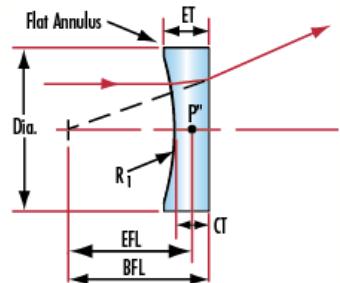


Figura 2.33: Lente Plano Concave

2.4.5 Double Concave

Composto da due superfici equamente curve verso l'interno. Ideale per l'espansione del fascio, la proiezione di luce e per l'espansione della lunghezza focale del sistema ottico.

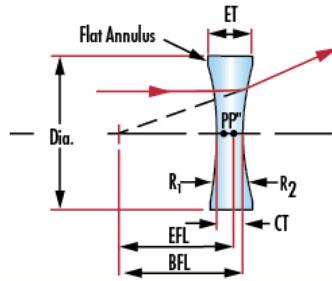


Figura 2.34: Lente Double Concave

2.4.6 Acromatico positiva

Esegue funzione simile a quella di una lente PCX o DCX, ma è in grado di fornire dimensioni di punto più piccole e immagini di qualità superiore. Lenti acromatiche sono utili per ridurre l'aberrazione sferica e cromatica

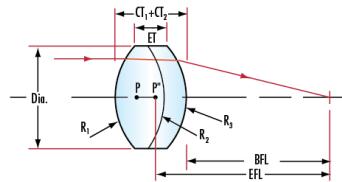


Figura 2.35: Lente Acromatica positiva

2.4.7 Asferica

Ideale per la focalizzazione laser o per la sostituzione di più lenti sferiche in un sistema. Utile per eliminare l'aberrazione sferica riducendo notevolmente le altre aberrazioni.

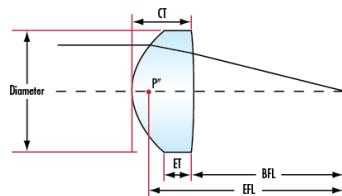


Figura 2.36: Lente Asferica

Capitolo 3

Visione artificiale

La visione artificiale è un campo che include i metodi per l'acquisizione, elaborazione, analisi e comprensione delle immagini, ed in generale, dati ad alta dimensionalità acquisiti dall'ambiente circostante per produrre informazioni numeriche o simboliche, ad esempio, sotto forma di decisioni.

Un tema chiave nello sviluppo di questo campo è replicare le capacità di visione umana, la percezione e comprensione di un'immagine con ausili informatici. Questa comprensione dell'immagine può essere vista come la separazione delle informazioni simboliche dai dati di immagine utilizzando modelli costruiti con l'aiuto di geometria, fisica, statistica e teoria dell'apprendimento. La visione artificiale rappresenta anche un campo avente vaste applicazioni industriali per il controllo di processo, tracciabilità, sicurezza e calibrazione.

I dati immagine possono assumere molte forme, come ad esempio sequenze video, viste della stessa scena da più telecamere, o dati multidimensionali da uno scanner medico. Come disciplina tecnologica, la visione artificiale cerca di applicare le sue teorie e modelli alla realizzazione sistemi in grado di "capire" ed estrarre le informazioni.

Sotto-domini della visione artificiale includono la ricostruzione delle scene, il rilevamento degli eventi, il monitoraggio video, il riconoscimento di oggetti, l'apprendimento, l'indicizzazione, la stima del movimento e il ripristino dell'immagine .

3.1 Processamento delle immagini

La moderna tecnologia digitale ha reso possibile manipolare segnali multidimensionali con sistemi che vanno da semplici circuiti digitali a elaboratori paralleli avanzati

3.1.1 Immagine reale

Un'immagine definita nel mondo reale è considerata una funzione di due variabili reali, per esempio, $a(x, y)$ dove a rappresenta la luminosità dell'immagine alle coordinate (x, y) coppia reale. Un'immagine a sua volta può essere considerata contenente sotto-immagini definite regioni di interesse, ROI o semplicemente regioni. Questo concetto riflette il fatto che le immagini contengono spesso collezioni di oggetti, ciascuno dei quali può essere la

base per una regione. In un sistema di elaborazione dell’immagine dovrebbe essere possibile applicare specifiche operazioni di elaborazione delle immagini per le regioni selezionate. Le ampiezze di una data immagine saranno quasi sempre numeri reali o numeri interi. Quest’ultimo è di solito il risultato di un processo di quantizzazione che converte un intervallo continuo (per esempio, tra 0 e 100%) in un numero discreto di livelli. In alcuni processi di formazione dell’immagine, tuttavia, il segnale può derivare dal conteggio di fotonni che implica un intrinseca natura quantizzata. In altre procedure di formazione dell’immagine, come la risonanza magnetica, la misura fisica diretta produce un numero complesso in forma di ampiezza e fase reale.

3.1.2 Immagine digitale

Un’immagine digitale $a[m, n]$ descritta in uno spazio discreto 2D è derivata da un ingresso analogico $a(x, y)$ in uno spazio continuo 2D attraverso un processo di campionamento che è spesso indicato come la digitalizzazione. L’immagine 2D continua $a(x, y)$ è divisa in N righe ed M colonne. l’intersezione di una riga ed una colonna è definita pixel. Il valore assegnato alle coordinate intere $[m, n]$ con $m = 0, 1, 2, \dots, M - 1$ e $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ è $a[m, n]$. Nella maggior parte dei casi il segnale $a(x, y)$, che potremmo considerare il segnale fisico che incide sulla faccia di un sensore 2D, è in realtà una funzione di molte variabili tra cui profondità (z), colore (λ) e tempo (t). Se non diversamente indicato, si prenderà in considerazione il caso 2D, monocromatico e con immagini statiche.

L’immagine digitale è la rappresentazione numerica di una immagine bidimensionale. La rappresentazione può essere di tipo vettoriale oppure *raster* (altrimenti detta *bitmap*); nel primo caso sono descritti degli elementi primitivi, quali linee o poligoni, che vanno a comporre l’immagine; nel secondo l’immagine è composta da una matrice di punti, detti pixel, la cui colorazione è definita (codificata) tramite uno o più valori numerici (bit).

Immagine bitmap

In questo tipo di immagini, i valori memorizzati indicano le caratteristiche di ogni punto dell’immagine da rappresentare (pixel). Nelle immagini a colori, viene memorizzato solitamente il livello di intensità dei colori fondamentali (nel modello di colore RGB, uno dei più usati, sono tre: rosso, verde e blu, nel modello CMYK, usato per la stampa, sono quattro: ciano, magenta, giallo e nero).

Nelle immagini monocromatiche in scala di grigio (dette impropriamente bianco e nero) il valore indica l’intensità del grigio, che varia dal nero al bianco. Il numero (detto anche “profondità”) di colori o di livelli di grigio possibili dipende dal massimo numero di combinazioni permesse dalla quantità di bit utilizzata per ognuno di questi dati: un’immagine con 1 bit per pixel avrà al massimo due combinazioni possibili (0 e 1) e quindi potrà rappresentare solo due colori bianco e nero; nelle immagini a 4 bit per pixel, si possono rappresentare al massimo 16 colori o 16 livelli di grigio; un’immagine a 8 bit per pixel 256 e così via. Oltre a questi dati, è solitamente presente un *header* contenente diverse informazioni sull’immagine, quali il numero di righe e colonne; le dimensioni sono necessarie per poter dividere e disporre la sequenza di pixel in linee, in modo da formare una

griglia rettangolare di punti, simile ad un mosaico, in cui ogni riga è formata da un numero preciso (indicato appunto dal valore larghezza) di tessere. Le immagini bitmap possono essere memorizzate in diversi formati, spesso basati su un algoritmo di compressione, che può essere *lossy* (in cui c'è perdita di informazione), come nelle immagini JPEG, oppure *lossless* (senza perdita), come nel caso dei file d'immagine GIF o PNG. Questo tipo di immagini può essere generato da una grande varietà di dispositivi d'acquisizione: scanner e fotocamere digitali (contenenti dei sensori CCD o CMOS), ma anche radar e microscopi elettronici; inoltre possono venire sintetizzate anche a partire da dati arbitrari, come funzioni matematiche bidimensionali o modelli geometrici tridimensionali.

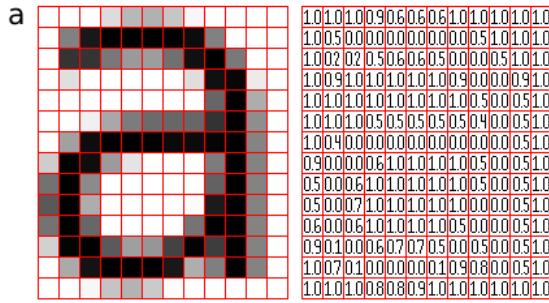


Figura 3.1: Rappresentazione numerica di un'immagine

3.1.3 Tipi di operazioni sulle immagini

I tipi di operazioni che possono essere applicati all'immagine digitale $a[n, m]$ per trasformarla nell'immagine $b[n, m]$ possono essere classificate in 3 categorie [9]

Puntuali: L'uscita di un'operazione a delle determinate coordinate dipende solo dal valore di input a quelle coordinate.

Locali: L'uscita di un'operazione a delle determinate coordinate dipende dai valori di ingresso in un "vicinato" (*neighborhood*) delle stesse coordinate.

Globali: L'uscita di un'operazione a delle determinate coordinate dipende dai valori di ingresso di tutta l'immagine.

3.1.4 Istogramma dei livelli di grigio

Per ogni livello di grigio, riporta il numero di pixel aventi quel valore, esso è utile per comprendere in maniera immediata le caratteristiche dell'immagine e individuare eventuali modifiche che possano migliorare la sua qualità. È possibile applicare degli operatori puntuali basati sull'istogramma sotto forma di un'opportuna trasformazione, tali trasformazioni sono tipicamente orientate al miglioramento della qualità dell'immagine (*image enhancement*), esse si realizzano generalmente tramite una funzione $y = y(x)$, che ad un

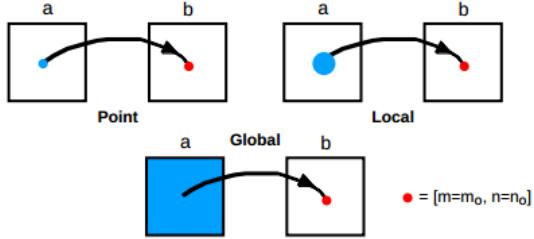


Figura 3.2: Operazione puntuale, locale,globale.

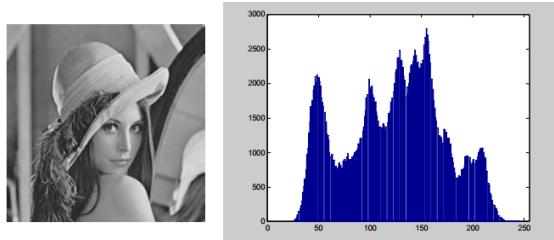


Figura 3.3: Istogramma dei livelli di grigio.

livello di grigio x dell'immagine in ingresso, fa corrispondere il valore y per l'immagine in uscita. La trasformazione si può realizzare anche tramite delle *Look-up Table* (LUT) che permettono un'implementazione hardware efficiente. Le operazioni principali applicabili sono

- Inversione dei livelli di grigio
- Compressione logaritmica
- Compressione potenza

Espansione del contrasto

L'espansione del contrasto si realizza per aumentare la dinamica di un'immagine il cui istogramma è concentrato in un intervallo limitato dei valori possibili. Consideriamo ad esempio una trasformazione del tipo:

$$y(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < 150 \\ \frac{255(X-150)}{150} & \text{se } x \geq 150 \end{cases}$$

Essa è in grado di rimappare la gamma dinamica nell'intervallo visibile (Figura 3.8)

Equalizzazione dell'istogramma

E' una tecnica che mira a modificare la forma dell'istogramma redistribuendo i valori dei livelli di grigio in modo che l'istogramma sia quanto più uniforme possibile con l'obiettivo

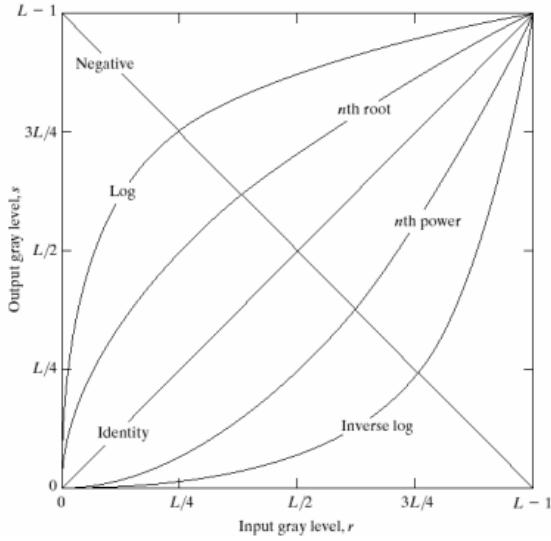


Figura 3.4: Trasformazioni su istogramma.



Figura 3.5: Inversione dei livelli di grigio.

di migliorare l’immagine a debole contrasto. Tuttavia, un’equalizzazione non porta necessariamente ad un miglioramento dell’immagine (Es. immagine con istogramma bimodale).

3.1.5 Binarizzazione

In molti casi gli scenari di interesse conducono ad immagini che possono essere considerate binarie, cioè contenenti nel caso ideale solo due livelli di grigio (bianco, nero): testo stampato, manoscritto, parti meccaniche piatte, sagome. In altri casi, le immagini in analisi sono intrinsecamente a più livelli di grigio, ma l’unico contenuto rilevante è dato dalla forma degli oggetti, delle regioni o delle linee. Anche in queste circostanze il modello ideale è un’immagine a due livelli[11]. Dopo l’acquisizione di una scena da parte di un dispositivo di *imaging*, l’immagine che si ottiene è comunque formata da numerosi livelli di grigio (tipicamente 256). Le ragioni sono principalmente riconducibili a illuminazione non omogenea della scena, banda limitata del sistema che limita la ripidezza dei fronti in

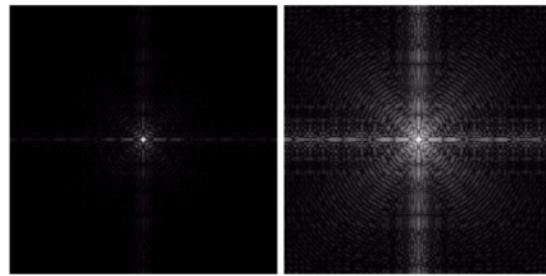


Figura 3.6: Compressione logaritmica.

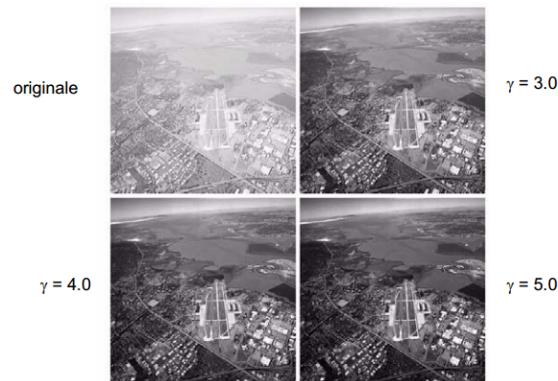


Figura 3.7: Compressione potenza.

corrispondenza dei bordi e distorsioni impresse dal sistema ottico. Sono quindi necessari degli algoritmi per la trasformazione di un’immagine a livelli di grigio in immagine binaria (binarizzazione), in modo da conservare quanto più possibile il contenuto rilevante.

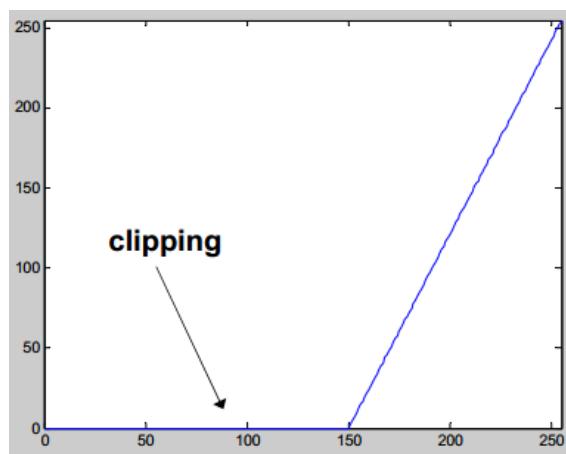


Figura 3.8: Esempio di espansione del contrasto.

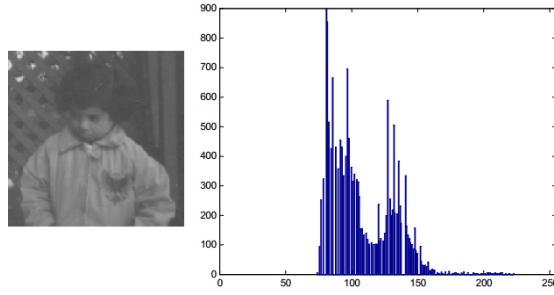


Figura 3.9: Prima dell’equalizzazione.

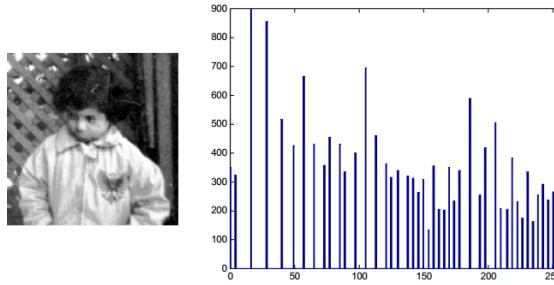


Figura 3.10: Dopo l’equalizzazione.

In letteratura sono stati proposti numerosi algoritmi di binarizzazione, ciò è giustificato dall’intrinseca difficoltà del problema e dalla diversità delle caratteristiche delle immagini da trattare.

Soglia fissa

La soluzione più semplice è quella di fare uso di una soglia fissa S per cui la binarizzazione si realizza tramite la trasformazione:

$$a(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < S \\ 1 & \text{se } x \geq S \end{cases}$$

La difficoltà in questo caso è data dall’individuazione del valore della soglia S che renda efficace l’operazione di binarizzazione. Esistono diversi metodi per valutare la soglia automaticamente a partire dall’istogramma dei livelli di grigio dell’immagine originale.

3.1.6 Soglia basata su istogramma

In alcuni casi favorevoli, l’istogramma dell’immagine da binarizzare presenta un andamento nettamente bimodale, sono cioè presenti due picchi (modes) che rappresentano distintamente lo sfondo e gli oggetti presenti nella scena: in questo caso, la soglia viene fissata in corrispondenza del punto di minimo tra i due picchi quindi la determinazione della soglia richiede la preventiva individuazione dei due picchi nell’istogramma. Mentre

l'individuazione del primo dei due picchi è semplice (coincide con il livello di grigio a massimo valore nell'istogramma), trovare il secondo picco può essere più difficile, in quanto non è detto che coincida con il secondo valore più grande nell'istogramma.

3.1.7 Compensazione dello sfondo

Al segnale d'immagine può spesso sovrapporsi un segnale spurio di fondo che si produce nel corso dell'acquisizione dell'immagine è dovuto all'illuminazione della scena o alla disomogeneità del fondo. È opportuno rimuovere tale segnale spurio (compensazione dello sfondo) prima della binarizzazione in quanto potrebbe causare degli artefatti nell'immagine binarizzata.

La compensazione dello sfondo può essere semplicemente realizzata sottraendo dall'immagine da trattare l'immagine dello sfondo ripreso in assenza di oggetti e mantenendo le stesse condizioni di illuminazione e di configurazione del sensore. Se l'immagine dello sfondo “vuoto” non è disponibile, si può utilizzare in sua vece il risultato di un filtraggio dell'immagine ottenuto con un filtro di media molto ampio.

3.1.8 Operatori locali

Questi operatori sono usati per il miglioramento della qualità di un'immagine (come per gli operatori puntuali) e per l'estrazione di caratteristiche dell'immagine (immagine in ingresso → immagine delle caratteristiche). Il valore di uscita dell'operatore nel punto (i,j) dipende solo dai valori di ingresso in un vicinato del punto (i,j); vicinato che di solito viene definito in maniera simmetrica rispetto al punto (i,j). Tali operatori possono essere di tipo lineare o non lineare.

Nei filtri lineari l'uscita è una combinazione lineare dei valori dei pixel di ingresso, i coefficienti della combinazione sono disposti su una sotto-immagine delle stesse dimensioni del vicinato del punto, in modo da corrispondere ai punti che vanno a pesare. La sotto-immagine viene definita maschera o filtro (*filter*, *mask*, *kernel*), perciò si parla di filtraggio spaziale. La valutazione di un operatore locale richiede che la maschera sia applicata su tutti i punti dell'immagine, tale processo corrisponde alla convoluzione.

3.1.9 Filtri di smoothing

I filtri di *smoothing* hanno come obiettivo il miglioramento della qualità dell'immagine, essi hanno l'effetto di diminuire il contrasto locale dell'immagine, sono usati per eliminare i dettagli inutili (*blurring*) o legati alla presenza di rumore (*noise cleaning*); tipicamente calcolano la media dei valori dei pixel in un intorno simmetrico (3x3, 5x5, 7x7, ...). Sono utilizzate anche altre maschere che realizzano una media pesata, ad esempio è possibile ottenere un filtro gaussiano discretizzando una funzione gaussiana bidimensionale in una griglia nxm da utilizzare come maschera di convoluzione. Poiché i valori dei pixel di uscita devono rimanere nello stesso range di ingresso i coefficienti della maschera $w(i)$ devono essere normalizzati per rispettare la condizione:

$$w_i \geq 0 \forall i \quad \sum_i w_i = 1$$

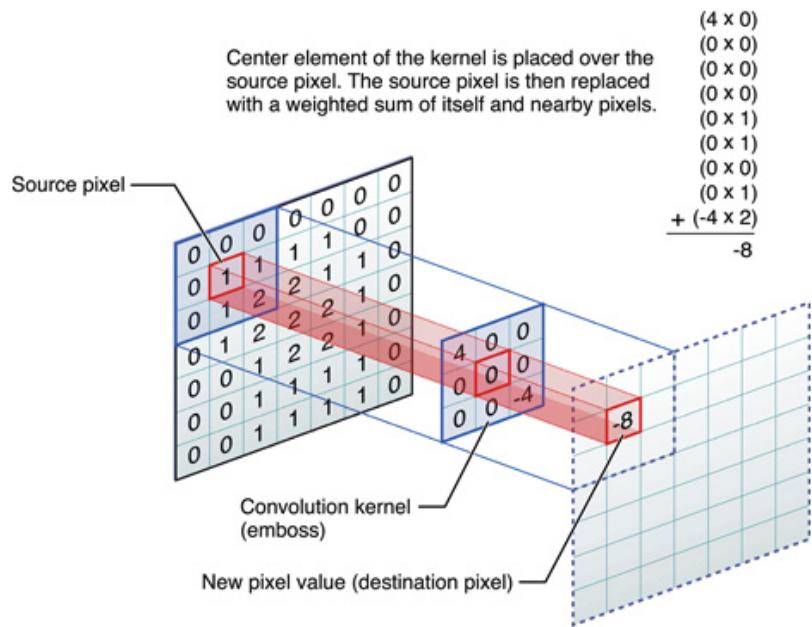


Figura 3.11: Applicazione di un operatore locale.

se queste condizioni sono valide, una zona a valore di grigio costante entro la maschera del filtro resta immutata dopo il filtraggio e l'effetto del filtro resta limitato ai dettagli dell'immagine (zone ad alta frequenza spaziale)

$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/9$
$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/9$
$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/9$	$1/9$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$
$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$	$1/25$

Figura 3.12: Filtri di smoothing - Media

0.0113	0.0838	0.0113
0.0838	0.6193	0.0838
0.0113	0.0838	0.0113

Figura 3.13: Filtri di smoothing - Gaussiano con media 0 e dev standard 0.5

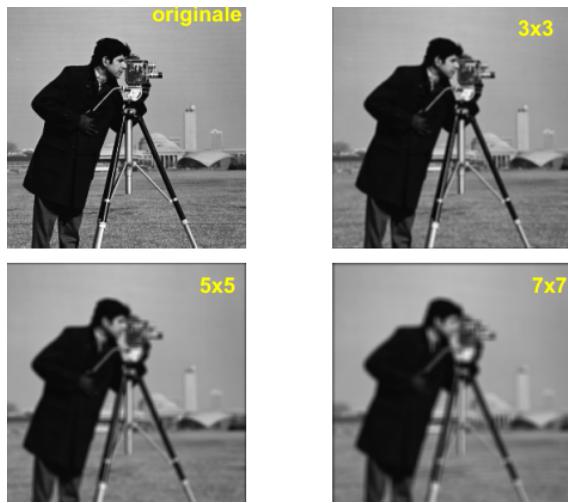


Figura 3.14: Filtri di smoothing - Blurring con dimensioni maschera differenti

3.1.10 Filtri di sharpening

Lo scopo di questo tipo di filtri è di incrementare la nitidezza dell’immagine aumentando il contrasto locale, di conseguenza, vengono enfatizzati i dettagli fini e le regioni di bordo, al contrario dei filtri di *smoothing*. In definitiva, tali filtri agiscono come filtri passa-alto rispetto alla frequenza spaziale. I filtri di *sharpening* vengono realizzati tramite operazioni di differenziazione spaziale, l’ampiezza della risposta di un operatore differenziale è proporzionale al grado di discontinuità dell’immagine nel punto in cui l’operatore è applicato. Applicare tali operatori enfatizza i bordi e altre discontinuità (rumore) e de-enfatizza le aree con livelli di grigio lentamente variabili. Nel definire un operatore differenziale del secondo ordine, una caratteristica da garantire è che la risposta sia indipendente dalla direzione della discontinuità nell’immagine (operatore isotropo). L’operatore derivativo isotropo più semplice è il *laplaciano*:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$$

L'implementazione del laplaciano per immagini digitali si realizza utilizzando le implementazioni delle derivate seconde.

$$\begin{array}{c}
 \nabla^2 f \\
 \rightarrow \\
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline
 0 & +1 & 0 \\ \hline
 +1 & -4 & +1 \\ \hline
 0 & +1 & 0 \\ \hline
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura 3.15: Laplaciano



Figura 3.16: Laplaciano applicato ad un immagine

Il laplaciano può essere assunto come segnale correttivo da combinare con il segnale originale

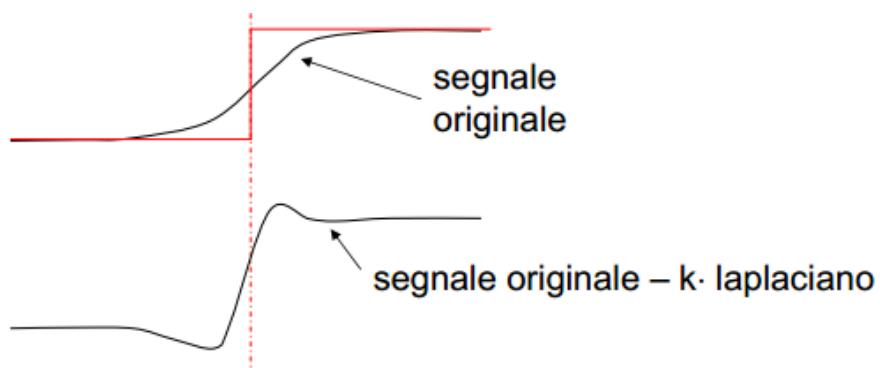


Figura 3.17: Correzione del segnale originale con laplaciano

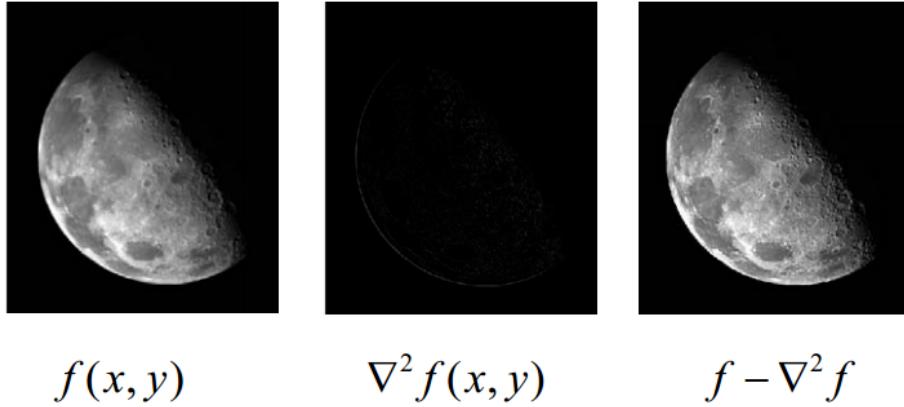


Figura 3.18: Laplacian sharpening

3.1.11 Canny edge detector

Nell’elaborazione di immagini, l’algoritmo di Canny[3] è un operatore per il riconoscimento dei contorni (edge detection) ideato nel 1986 da John F. Canny. Utilizza un metodo di calcolo multi-stadio per individuare contorni di molti dei tipi normalmente presenti nelle immagini reali. Canny ha anche prodotto una teoria del riconoscimento dei contorni che si propone di spiegare i fondamenti di questa tecnica.

Per il riconoscimento dei contorni l’algoritmo di Canny usa un filtro basato sulla derivata prima di una funzione gaussiana. I risultati prodotti sono disturbati dal rumore presente nei dati di un’immagine “grezza”. Per questo motivo, prima di iniziare l’elaborazione, l’immagine raw viene sottoposta a convoluzione con un filtro gaussiano. Il risultato è un’immagine con una leggera “sfocatura” gaussiana, in cui nessun singolo pixel è affetto da disturbi di livello significativo.

Un contorno di un’immagine può puntare verso una direzione qualsiasi, dunque l’algoritmo di Canny usa quattro filtri differenti per individuare i contorni: orizzontale, verticale e diagonali dell’immagine, a cui è stato precedentemente applicato il filtro gaussiano. Per ciascun pixel risultante viene assunta come valida la direzione relativa al filtro che dà il valore maggiore. Questa direzione, combinata col valore ottenuto applicando il filtro, corrisponde a quella in cui si ha il massimo gradiente di luminosità in ciascun punto dell’immagine.

La mappa dei gradienti fornisce il valore dell’intensità luminosa in ciascun punto dell’immagine. Una forte intensità indica una forte probabilità della presenza di un contorno. Tuttavia, questa indicazione non è sufficiente a decidere se un punto corrisponde oppure no ad un contorno. Un massimo locale si ha nei punti in cui la derivata del gradiente si annulla. Solo i punti corrispondenti a dei massimi locali sono considerati come appartenenti ad un contorno, e saranno presi in considerazione dai successivi passi di elaborazione.

L’estrazione dei contorni dalla mappa generata al passo precedente si esegue con un procedimento chiamato binarizzazione con isteresi. Vengono definite due soglie, una bassa

ed una alta, che vengono confrontate con il gradiente in ciascun punto. Se il valore del gradiente è:

- inferiore alla soglia bassa, il punto è scartato;
- superiore alla soglia alta, il punto è accettato come parte di un contorno;
- compreso fra le due soglie, il punto è accettato solamente se contiguo ad un punto già precedentemente accettato.

La presenza di due soglie (da cui il riferimento all'isteresi) è giustificato dal fatto che è praticamente impossibile trovare un unico valore del gradiente di luminosità per discriminare se un punto appartiene o no ad un contorno. Al termine di questo step si ottiene un'immagine binaria dove ciascun pixel è marcato come appartenente o no ad un contorno. La mappa ottenuta in questo modo può essere trattata come un insieme di curve di contorno che, previa ulteriore elaborazione, può essere approssimato da una poligonale.

L'algoritmo di Canny si basa su parametri che possono influenzare sia il tempo di elaborazione che la stessa qualità dei risultati prodotti. I parametri sono:

Dimensione del filtro gaussiano: il filtro sfuocatore applicato nel primo step di elaborazione influenza direttamente i risultati generati dall'algoritmo. Filtri più piccoli producono una minore sfocatura, e permettono di riconoscere contorni più netti. Filtri più grandi producono una maggiore sfocatura, facendo debordare i singoli pixel su aree più estese, e sono più indicati per riconoscere contorni più ampi e più sfumati - come ad esempio il contorno di un arcobaleno.

Soglie applicate: l'uso di due soglie con isteresi garantisce una maggior flessibilità rispetto alla soglia singola, ma non risolve tutti i problemi insiti nell'applicazione di un filtro di questo tipo. Una soglia settata ad un valore troppo alto può provocare la perdita di informazioni significative, mentre una soglia settata ad una valore troppo basso può far sì che informazioni irrilevanti, ad esempio semplici disturbi, possano essere interpretate come elementi importanti dell'immagine. È difficile trovare un valore generico di soglia che possa andar bene per tutte le immagini, ed in effetti non è stato ancora trovato un approccio che dia sempre risultati soddisfacenti.

3.2 Riconoscimento di oggetti

Il riconoscimento di oggetti è la capacità di trovare un determinato oggetto in una sequenza di immagini o video. L'uomo riconosce una moltitudine di oggetti in immagini con poco sforzo, nonostante il fatto che l'immagine degli oggetti possa variare un po' in diversi punti di vista, in diversi formati/scala o rotazione. Inoltre gli oggetti possono essere riconosciuti anche quando sono parzialmente esclusi dalla vista. Questo compito è ancora una sfida per la visione artificiale in generale. David Lowe (computer scientist) ha sperimentato l'estrazione e l'utilizzo di descrittori invarianti alla scala SIFT in modo da rendere il riconoscimento più affidabile[8].

Per ogni oggetto in un’immagine, ci sono molte “features” che possono essere estratte in modo da formare una descrizione caratteristica dell’oggetto. Questa descrizione estratta da una immagine campione può poi essere utilizzata per identificare l’oggetto durante il tentativo di individuazione in una immagine di test contenente più oggetti. È importante che l’insieme di caratteristiche estratte dall’immagine campione sia insensibile a variazioni di scala delle immagini, disturbi, variazione dell’illuminazione e distorsioni geometriche, in modo da rendere affidabile il riconoscimento.

3.2.1 Template matching

Nel contesto dell’interpretazione delle immagini, l’obiettivo centrale è quello di riconoscere gli oggetti presenti all’interno di un’immagine. “Riconoscere” un oggetto significa verificare che nell’immagine si presente un’istanza dell’oggetto di cui è memorizzata una rappresentazione. Il primo e più semplice approccio al problema del riconoscimento nel caso delle immagini è quello di confrontare direttamente l’immagine dell’oggetto cercato con l’immagine in esame. Questo tipo di approccio si definisce template matching. Si basa sulla misura della similarità esistente tra il prototipo dell’oggetto da riconoscere (template) e una parte dell’immagine. Siccome non si conoscono a priori le regioni in cui l’istanza può presentarsi, è necessario confrontare il template con tutte le sottoparti dell’immagine che hanno le stesse dimensioni del template, a questo scopo, il template viene fatto scorrere sequenzialmente sull’intera immagine, valutando per ogni possibile posizione la similarità tra il template e la regione dell’immagine.

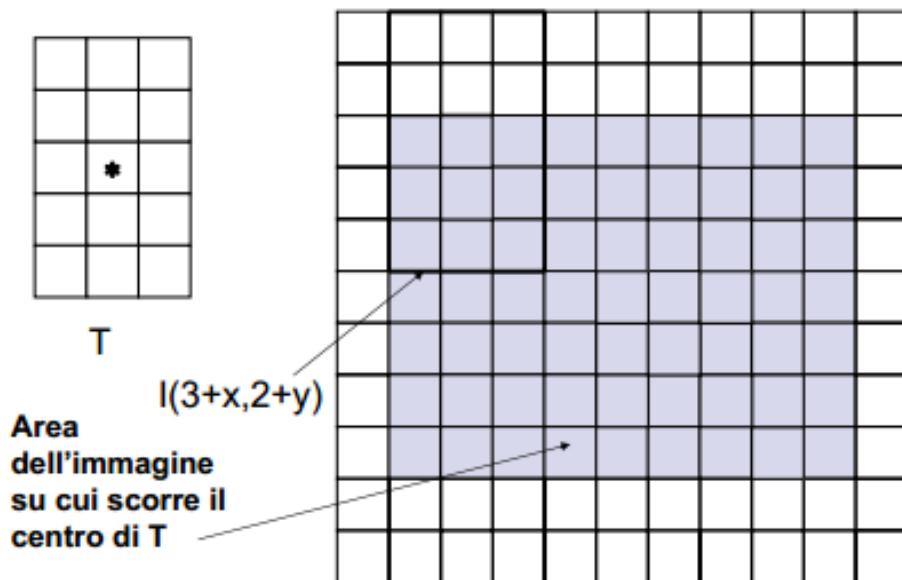


Figura 3.19: Template matching

3.2.2 Funzioni per la descrizione dell'immagine

Visti i limiti del template matching, non è pensabile di realizzare un sistema efficiente di riconoscimento che si basa sul confronto diretto tra le matrici di pixel. La rappresentazione in pixel è infatti:

- Ridondante
- Estremamente sensibile a modifiche anche insignificanti

Oltre alla matrice di pixel, esistono altri tipi di rappresentazione più compatte e più utili ai fini del riconoscimento, alcune di queste sono basate sul contorno dell'oggetto:

- Chain code
- Approssimazione poligonale
- Signatures

3.2.3 Signature

Una signature è una rappresentazione monodimensionale del contorno di un oggetto, l'idea di base è di ridurre la rappresentazione del contorno (tipicamente bidimensionale) ad una funzione monodimensionale, presumibilmente più facile da gestire. Un tipico esempio di signature è data dall'andamento della distanza dei punti del contorno dal baricentro dell'oggetto al variare di un angolo θ . Questo tipo di rappresentazione è indipendente rispetto alla traslazione e può essere realizzata in modo da poter essere poco sensibile rispetto a

Rotazione Scegliendo sempre lo stesso punto di inizio (es. il punto del contorno più lontano dal baricentro o l'intersezione con l'asse principale di inerzia).

Scala Normalizzando i valori della funzione rispetto al valore massimo o alla deviazione standard.

3.2.4 Dalla rappresentazione alla descrizione

Sebbene altri tipi di rappresentazione siano più efficaci rispetto alla semplice matrice di pixel, ai fini del riconoscimento risultano essere ancora ridondanti e sensibili a variazioni non significative. È quindi opportuno considerare, invece della rappresentazione dell'oggetto di interesse, una sua descrizione: l'insieme delle misure o delle proprietà qualitative che permettono di caratterizzare completamente l'oggetto ai fini del riconoscimento. Deve risultare insensibili a variazioni non significative presenti sulle istanze dell'oggetto e consentire di discriminare istanze di oggetti diversi

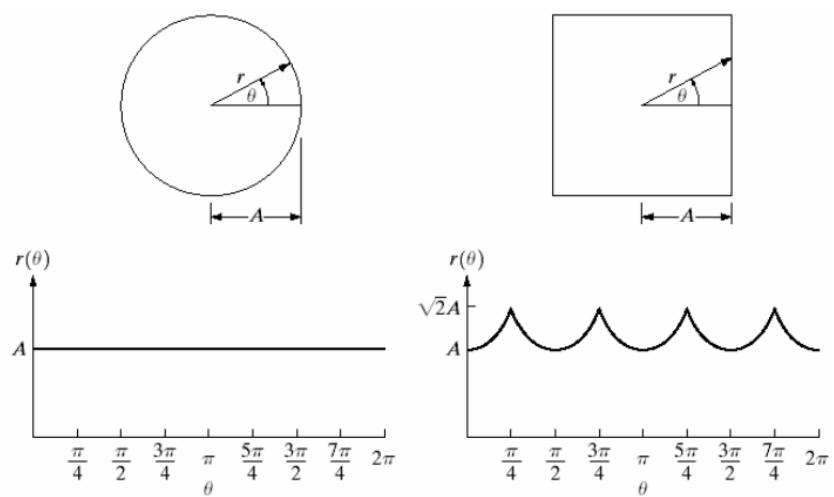


Figura 3.20: Signatures

Capitolo 4

Ispezione automatica dei dispositivi elettronici

Nuovi sviluppi nell’assemblaggio di PCB non possono avvenire se non con cambiamenti corrispondenti nella tecnologia di controllo della qualità [7]. Il test in-circuit è stato per anni il mezzo principale per la rilevazione e la diagnosi dei difetti poiché rimuovendo la barriera del “design for testability” (La realizzazione di un progetto introducendo parti e componenti accessorie volte a facilitare o a permettere test altrimenti impossibili) ha reso possibile realizzare sistemi complessi senza la paura di non poterli testare. Il test in circuit è stato per tanto un approccio semplice ed universale al problema del controllo qualità nell’industria elettronica ma risulta essere sempre più difficile applicarlo a causa della miniaturizzazione che rende spesso impraticabile il test tradizionale per mezzo di sistemi a sonde mobili o a letto d’aghi. Considerando altre tecnologie quale il boundary scan, l’ispezione a raggi x, l’ispezione ottica manuale e l’ispezione ottica automatica nessuna è in grado di sostituire totalmente il test in-circuit ma è in grado di complementarlo efficientemente. Tutti i processi usano l’ispezione ottica manuale. Gli ispettori in uno stabilimento di assemblaggio ben gestito spesso sprecano la maggior parte del loro tempo ispezionando prodotti non difettosi e usano solo una frazione del loro tempo in maniera proficua al miglioramento ed al controllo della qualità (ovvero quando un difetto si presenta loro) esiste un modo tramite cui possiamo focalizzare la potenza dell’occhio umano solo sui difetti? Se un sistema AOI è utilizzato per coadiuvare l’ispezione manuale il numero di ispettori decresce (la semplicità del processo cresce) e la consistenza dell’ispezione migliora. Consideriamo una scheda dove 5000 saldature di cui solo 10 sono inadeguate, se una macchina AOI la ispezionasse prima dell’uomo ed approvasse tutte le saldature corrette rimarrebbe solo da verificare manualmente le 10 saldature riportate come critiche dal sistema automatico, date le ambiguità delle performance umane (dovute a stanchezza e differenze tra individui diversi) adottare questa metodologia porterebbe ad una maggiore efficienza nel controllo qualità

Un sistema AOI non aggiunge nessuna nuovo concetto allo stabilimento, si limita a automatizzare una categoria di ispezioni già realizzata manualmente.

4.1 Principio di funzionamento di un sistema AOI

Un sistema AOI è in grado di acquisire milioni di pixel in una frazione di secondo, questi dati vengono utilizzati per l’ispezione visuale e per misure di precisione. Il sistema AOI scandisce visualmente la superficie della scheda elettronica: la scheda è illuminata da differenti sorgenti luminose ed osservata da uno scanner o da un numero arbitrario di telecamere ad alta definizione. Ogni produttore di sistemi AOI sviluppa degli algoritmi proprietari di ispezione e di tecniche di illuminazione, ciò si traduce in differenti punti di forza o debolezza a seconda della tipologia di prodotto ispezionato e delle tecniche impiegate. Illuminare correttamente la parte è una fase critica per un sistema AOI, esso deve essere in grado di vedere la parte da ispezionare e, soprattutto, le caratteristiche distintive del difetto da individuare, la luce amplifica i dettagli salienti e sopprime dettagli categorizzabili come rumore (ad esempio molti prodotti riflettono la luce causando aree di intensa illuminazione nell’immagine e ciò potrebbe oscurare i dettagli ricercati durante l’ispezione). Il dispositivo di *imaging* traduce la luce riflessa dalla parte da ispezionare in un’immagine elettronica che verrà successivamente elaborata. Il cervello di un sistema AOI è il “vision computer”, tale computer analizza l’immagine per estrarre misure, conteggi di parti, colori o altre caratteristiche visuali necessari all’ispezione.

4.2 Tipologie di ispezione ottica automatica delle schede elettroniche

4.2.1 Presenza di un componente

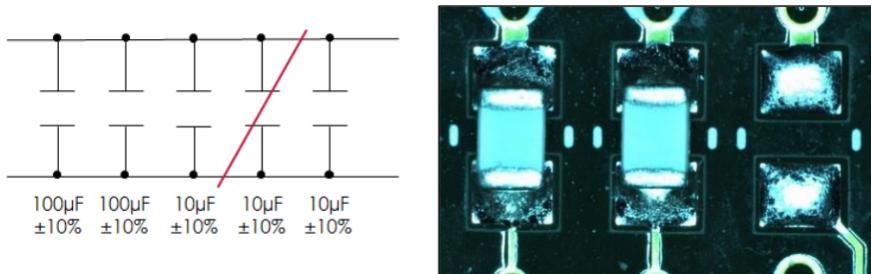


Figura 4.1: Test di presenza

Obiettivo di questo test è verificare la presenza di un componente sulla scheda, ciò assolve al doppio compito di verifica del componente corretto e controllo dell’assenza di un componente non corretto. I possibili scenari mitigati sono:

- Durante un passaggio della catena produttiva costituito da una saldatura manuale l’addetto ha dimenticato il componente oppure ne ha saldato uno sbagliato;
- Durante un passaggio della catena produttiva costituito da una posa automatica del componente e successiva saldatura automatica il sistema *pick and place* non ha

posizionato correttamente il componente o il processo di saldatura automatica non è stato affidabile provocandone il distacco. Un test di presenza ottica può completare la copertura dei possibili difetti rimediando a limitazioni del test *in-circuit* come l'assenza di un capacità di filtro in parallelo ad altre;

4.2.2 Posizionamento di un componente

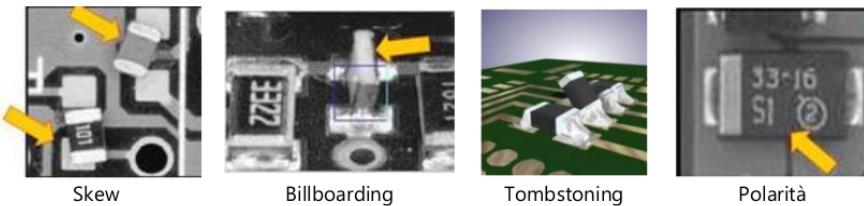


Figura 4.2: Test di posizionamento

Obiettivo di questo test è verificare che il montaggio di un componente sia avvenuto correttamente e che rispetti determinate specifiche meccaniche quali:

- Skew (rotazione del componente lungo l'asse perpendicolare alla scheda);
- Offset (traslazione del componente rispetto al baricentro atteso);

O che non si siano verificate delle condizioni di posizionamento anomalo:

- Componente saldato capovolto;
- Componente saldato verticalmente sulla scheda (billboarding);
- Componente parzialmente rialzato lungo un lato (tombstoning);
- Componente saldato con polarità errata;

4.2.3 Identificazione di un componente

Obiettivo di questo test è garantire la tracciabilità delle parti montate su di una scheda o delle schede testate tramite l'inserimento di un codice nel database del sistema CIM se se presente:

Verifica ottica dei caratteri La verifica ottica dei caratteri, o OCV, è uno strumento software di elaborazione elettronica delle immagini utilizzato per controllare la qualità di stampa o marcatura di una stringa di riconoscimento ottico dei caratteri (OCR) e confermarne la leggibilità. Oltre a verificare che il contenuto della stringa di testo presentata sia corretto, provvede anche a controllarne la qualità, il contrasto e la nitidezza, segnalando o rifiutando i campioni di scarsa qualità. Un'applicazione fondamentale che utilizza l'OCV è la verifica dei codici di data e lotto (stampati

su un’etichetta o marcati direttamente sulla confezione o sul prodotto) nel confezionamento di prodotti farmaceutici, dispositivi sanitari, cosmetici e altri beni di consumo. Viene utilizzato un software OCR per leggere una stringa di testo e per provare a leggere anche un testo di scarsa qualità o rovinato, formulando l’ipotesi migliore sui dati. Sarà poi il software OCV a controllare la qualità e confermare la leggibilità del testo. Questo controllo viene attuato molto spesso per confermare che i codici di data e lotto stampati siano corrispondenti a quelli attesi.

Riconoscimento ottico dei caratteri A differenza della verifica dei caratteri il riconoscimento non parte da una base conosciuta ma viene usato per riconoscere ed interpretare i caratteri impressi su di un dispositivo per poi inserirli in un database o intraprendere azioni differenti.

Lettura di codici a barre Un codice a barre viene impresso sui dispositivi al fine di rappresentare un mezzo ottico affidabile e compatto per trasportare dei dati facilmente estraibili da sistemi automatici.

4.2.4 Test della saldatura

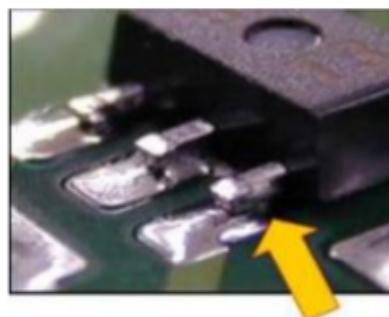


Figura 4.3: Test della saldatura

Obiettivo di questo test è garantire che il processo di saldatura sia conforme alle specifiche di produzione. Alcune categorie di difetti rilevabili sono:

- Pin sollevati/aperti;
- Cortocircuiti tra i pin dovuti a leghe saldanti in eccesso;
- Giunti di saldatura con eccesso o insufficienza di lega saldante;
- Saldatura fredda;

4.2.5 Test del circuito stampato

Obiettivo di questo test è garantire che il circuito stampato sia integro prima dell’effettiva popolazione. Alcune categorie di difetti rilevabili sono:

- Cortocircuiti tra le piste;
- Piste interrotte;
- Pad o altre caratteristiche della scheda mancanti;
- Violazione della larghezza delle piste imposta in fase progettuale;
- Violazione della distanza delle piste imposta in fase progettuale;
- Eccessiva presenza di rame;

4.2.6 Riconoscimento di punti fiducial

l’ispezione ottica automatica ha principalmente finalità di controllo qualità ma può essere impiegata anche per il riconoscimento di punti fiduciari (fiducials). Ciò permette di avere un raggiungere un elevata precisione in di contattazione in sistemi che utilizzano l’equipaggiamento di visione a tal scopo. Il riconoscimento dei punti fiduciari rappresenta per i sistemi di collaudo in oggetto un metodo per correlare la posizione della scheda all’interno dell’area di lavoro, con le quote definite nel progetto del prodotto da collaudare.

4.3 Sistemi di collaudo SPEA

4.3.1 Flying probe



Un flying probe è un sistema per il test automatico delle schede elettroniche (pre e post popolamento) che usa un sistema di misura simile ad un tester *in-circuit*. A differenza di un tester tradizionale, che utilizza *fixture* a letto d’aghi, utilizza un numero di sonde sia fisse che mobili per effettuare la contattazione. A seconda del modello, un tester di questa tipologia può essere equipaggiato con un numero variabile tra 1 e 20 probe (di solito 4) in grado di contattare la scheda sotto test sia dal lato superiore che da quello inferiore, in modo da scansire ogni nodo del circuito in successione; questa tipologia di sistemi risulta in grado di raggiungere prestazioni di contattazione (precisione nel posizionamento) nell’ordine dei 100 µm e frequenze di contattazione media nell’ordine di 40 contattazioni al secondo (variabili a seconda della distanza di movimento delle sonde).

Considerando che non è necessario un adattatore specifico per la contattazione (sono assenti i costi di *fixturing* e l’attesa per la realizzazione dell’adattatore) sono adatti al collaudo di prototipi, piccoli lotti di produzioni o per un utilizzo come strumento di misura evoluto da parte di un tecnico esperto.

Tipi di test

I tester flying probe di solito effettuano misure di tipo analogico su grandezze quali resistenza, capacità e induttanza con scheda in collaudo spenta; Ciò permette di verificare il corretto montaggio e funzionamento di quasi tutte le tipologie di componenti discreti. La tipologia di sistemi in oggetto è spesso estesa con strumenti opzionali per includere altre metodologie di test quali boundary scan, AOI, test funzionale e ispezione termica al fine di aumentare il più possibile la copertura del collaudo e la qualità del prodotto finale.

Caratteristiche per campo di applicazione

Tester di questo tipo sono disponibili per l'applicazione al test delle schede elettroniche prima che vengano popolate, al test delle schede assemblate e per testare e riparare prodotti di ritorno dal campo.

PCB non popolate

I sistemi applicati all'ispezione di questa tipologia di PCB sono in grado di svolgere test di continuità e isolamento, sistemi dedicati a questa tipologia di test sono in grado di lavorare applicando tensioni elevate.

PCB popolate

I sistemi applicati all'ispezione di questa tipologia di PCB sono meno orientate al parallelismo ma includono una gamma di opzioni più vasta (di cui l'AOI fa parte) in modo da massimizzare la copertura dei possibili difetti.

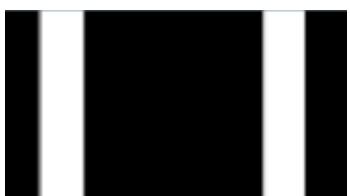
Riparazione

Questi sistemi operano solitamente con un numero minimo di probe, l'analisi delle impedenze viene utilizzata confrontando i risultati della scheda sotto test con quella di un prodotto privo di difetti. Il *throughput* non è significativo, la facilità d'uso e il prezzo contenuto sono fattori chiave.

Ispezione ottica

I sistemi flying probe sono in grado di effettuare le seguenti ispezioni ottiche:

Condensatore, resistenza ed induttanza SMT I sistemi a sonde mobili SPEA prevedono l'ispezione automatica di condensatori, resistenze e induttori SMT, l'algoritmo sviluppato come task durante il progetto di laurea in alto apprendistato è qui riassunto :

Immagine	Passo	Descrizione
	Sfocatura	l'immagine viene sfocata tramite un <i>kernel</i> gaussiano per eliminare le componenti di rumore presenti nell'immagine e rendere il successivo passo di <i>flood fill</i> [2] capace di evadere dalle variazioni di colore introdotte dal rumore.
	Segmentazione del case (FloodFill)	Il case viene rilevato effettuando un flood fill a partire dal baricentro del componente(proveniente dai dati cad). Se il risultato del flood fill è un area inferiore a quella attesa, il processo viene ripetuto selezionando casualmente un punto seme in un intorno del baricentro .
	Pin mask	l'immagine del case è sottratta a quella originale, il risultato di questa operazione viene binarizzato con un metodo di sogliatura alla Otsu.
	Pins detection	l'immagine del case viene ridotta lungo l'asse minore mediando i valori dei pixel della stessa riga/colonna, l'immagine contenente le intensità risultanti viene sogliata filtrando quindi i picchi non dovuti ai pin.
	Misura	Dalle transizioni nell'immagine ottenuta al passo precedente vengono determinate le larghezze dei pin, dalle transizioni più lontane viene determinata la larghezza del case, dall'area ottenuta al passo 2 invece viene determinata l'altezza del case. Il risultato del test (score) viene determinato tramite una metrica di similarità tra il case atteso e quello rilevato, una mappatura non lineare dei valori viene applicata per separare meglio score di case simili.

Pattern matching Il riconoscimento di pattern è una sotto-area dell'apprendimento automatico. Esso consiste nell'analisi e identificazione di pattern all'interno di dati grezzi al fine di identificarne la classificazione. Sui sistemi di collaudo SPEA è possibile confrontare l'immagine rilevata dal gruppo ottico con una serie di immagini campione (acquisite

tramite un processo di apprendimento che può essere automatico o supervisionato).

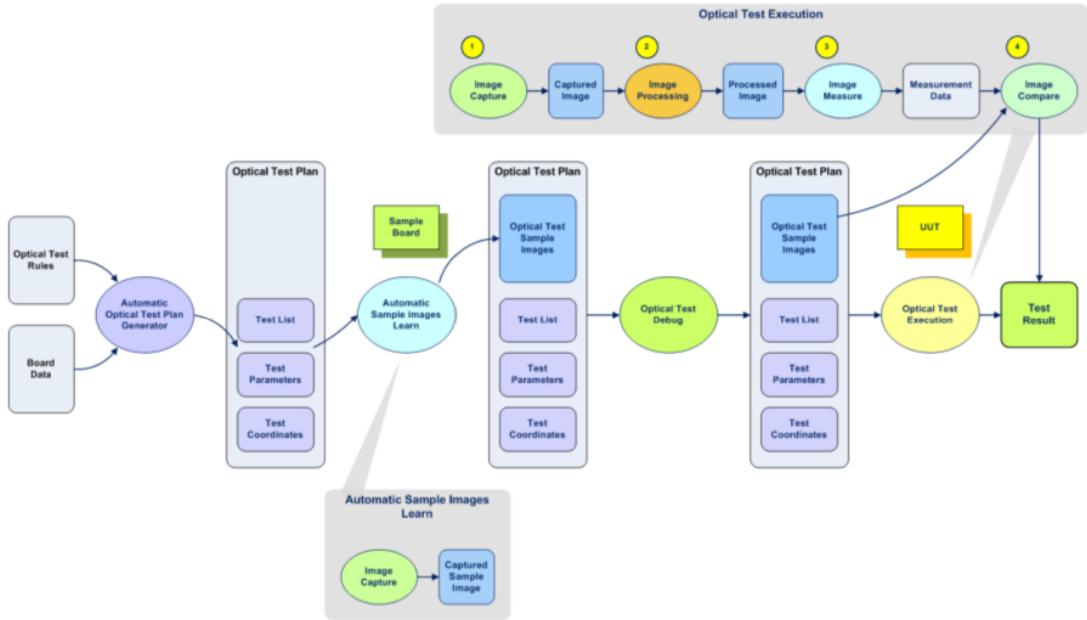


Figura 4.4: Flusso di un programma di ispezione ottica tramite pattern matching su flying probe SPEA

Altri utilizzi dell'equipaggiamento di visione Un sistema a sonde mobili necessita di precisioni di contattazione bassissime, è per questo che non è sufficiente inserire un prodotto da testare avendo cura di posizionarlo correttamente. Quando un prodotto da collaudare viene inserito all'interno di un sistema di collaudo a sonde mobili esso effettua un ispezione ottica per ottenere la rototraslazione del prodotto rispetto al sistema di riferimento macchina analizzando la presenza e soprattutto la posizione di due o più punti fiduciari (Fiducials).

- Il sistema viene acceso, la procedura di homing assicura che il manipolatore cartesiano (dotato di encoder relativi) trovi lo zero del sistema di riferimento macchina;
- Una scheda viene caricata in input
- La sonda dotata di telecamera si posiziona sul punto dove dovrebbe essere localizzato il fiducial;
- Viene ricercato tramite template matching un template precedentemente acquisito e la sua posizione in coordinate immagine viene correlata a quella dell'asse, per ottenere una posizione nel sistema di riferimento macchina;
- Similmente al punto 4 viene ricercato un secondo fiducial sulla scheda da testare;

- Sono quindi disponibili informazioni sulla rototraslazione della scheda all'interno del sistema e di conseguenza i successivi spostamenti (se effettuati nel sistema di coordinate della scheda) saranno automaticamente corretti;

4.3.2 Pick and Place handler



Il test finale è uno dei maggiori processi nella fabbricazione dei semiconduttori, risulta necessario testare i circuiti integrati prodotti prima della consegna al cliente per evitare di propagare difetti dei dispositivi prodotti sui prodotti del cliente. I flussi di test sono altamente automatizzati ed una fetta importante del mercato dei sistemi di test per questa categoria di prodotti è rappresentata da sistemi robotici, i pick and place handler, in grado di garantire un elevato *throughput*. I p&p handler agiscono come meccanismo di trasporto verso le stazioni di test dove il test elettrico viene effettuato per poi smistare (binning) i componenti a seconda del risultato del test. Motivazione per l'utilizzo di sistemi automatici di questo tipo è principalmente la dimensione dei dispositivi da testare (fino a 2x2 millimetri) che renderebbe difficoltosa la contattazione affidabile se non tramite meccanismi di posizionamento ad elevata precisione. La necessità di effettuare il test anche a differenti condizioni di temperatura (spesso parti per il mercato *automotive* o militare necessitano di rigidi protocolli di test in condizioni avverse) ne rappresenta un alto motivo. In un contesto di produzione industriale un handler può arrivare a testare fino a 25000 parti per ora.

Composizione di un pick and place handler

Dispositivo Di Input

l'input delle parti da testare può avvenire per mezzo dei meccanismi di caricamento più disparati, i più diffusi sono il caricamento per mezzo di vassoi aderenti a standard JEDEC, il caricamento in bobine ed il caricamento tramite unità a boccia (bowl feeder).

Spea Bfu

La bowl feeder unit è un dispositivo di input basato su una scodella (bowl) vibrante in grado di caricare i componenti sciolti su dei vassoi che successivamente saranno processati dall’unità di handling. L’unità BFU è dotata di sistemi di visione necessari a decidere quali movimenti subirà il componente prima di essere posato sul vassoio di uscita. Due telecamere sono in grado di rilevare su due stazioni diverse del sistema di input i casi in cui componente è ruotato oppure capovolto e quindi di correggerne l’orientamento inviando opportuni segnali di controllo alla stazione contenente l’attuatore.

Pick And Place

l’*handling* delle parti da testare viene effettuato per mezzo di un manipolatore cartesiano che una volta prelevate le parti sotto test dal dispositivo di input procede alla movimentazione lungo il piano orizzontale verso le stazioni di test. L’apparato in oggetto è dotato di sonde con *pickup* di tipo pneumatico in grado di prelevare i componenti senza danneggiarli per mezzo del vuoto, tali sonde sono dotate di movimentazione anche lungo l’asse Z.

Test Station

La test station si occupa di effettuare il test del dispositivo e comunicare al test handler il risultato, essa può essere indipendente dall’handler o strettamente integrata, differenti tipologie di stazioni sono disponibili. Da notare l’esistenza di stazioni di test elettromecaniche orientate al collaudo dei MEMS in grado di sottoporli a stimoli meccanici e misure analogiche altamente accurate.

Dispositivo Di Output

Come per il caricamento, l’output può avvenire su una vasta gamma di supporti di uscita: vassoio, bobina, tubo.

4.3.3 Spea RSU

La reel sort unit (RSU) è un dispositivo di output in grado di organizzare i componenti in uscita all’interno di bobine destinate alla vendita, questa unità è equipaggiata con un sistema di visione in grado di riconoscere componenti mal posizionati all’interno della bobina prima di sigillarla, per tanto effettua un test di tasca vuota ed uno di componente ben posizionato.

4.3.4 Tipi di ispezione ottica effettuati da pick and place handler

Calibrazione e built in self test

Un sistema appartenente alla categoria p&p handler è in grado di effettuare dei task di calibrazione riconoscendo tramite tecniche di ispezione ottica opportuni punti fiduciari impressi sullo chassis; ciò permette di evitare derive nel sistema di movimentazione o di

verificare tramite riconoscimento di codice a barre i dispositivi opzionali, non connessi elettricamente, necessari a portare a termine la ricetta di test in uso (presenza di vassoi di opportuno formato, correzione dei siti di test sostituibili dall’utente con i rispettivi dati di calibrazione).

Tracciabilità

I pick and place handler realizzano spesso funzionalità di tracciabilità riconoscendo per mezzo di ispezione ottica l’appartenenza di un componente sotto test ad un determinato lotto. Ciò permette la realizzazione di test cells in grado di effettuare il test di più lotti contemporaneamente e di smistare correttamente le parti. L’esito di questi controlli può essere successivamente comunicato al software CIM dell’industria.

Empty check su tester

Un componente da testare rimasto bloccato in un sito di test porterebbe ad un falso risultato poichè mantenendo la propria contattazione impedirebbe al nuovo dispositivo di essere contattato portando a falsi esiti. Risulta necessario sviluppare dei test AOI in grado di rilevare la presenza di componenti bloccati e disabilitare i siti di test prima informare un operatore.

Capitolo 5

Spea.Vision Library

Il lavoro svolto durante il percorso portato avanti in SPEA si è focalizzato principalmente sullo sviluppo di una libreria di visione che potesse soddisfare le esigenze di un'attività industriale la cui base è l'integrazione di unità funzionali per la realizzazione di sistemi complessi. Nella sezione 5.1 verrà fornita una panoramica sul dominio applicativo per poi passare nella sezione 5.2 dove verranno descritti i requisiti raccolti durante la realizzazione e l'affinamento della libreria di visione. Successivamente nella sezione 5.3 verranno discusse le scelte effettuate in fase di progetto, nella sezione 5.4 verrà descritta l'architettura della libreria.

5.1 Dominio applicativo

In ingegneria del software e in altre discipline informatiche, l'espressione dominio applicativo (o dominio dell'applicazione; in alcuni casi dominio del problema) si riferisce al contesto in cui una applicazione software opera, soprattutto con riferimento alla natura e al significato delle informazioni che devono essere manipolate. Nei più diffusi modelli e metodi di sviluppo del software, l'analisi del dominio (ovvero l'analisi volta a comprendere il contesto operativo in cui l'applicazione dovrà inserirsi) è una componente essenziale (e in genere preliminare) e dell'analisi dei requisiti.[12]

Una libreria di visione artificiale orientata all'utilizzo industriale comprende moduli appartenenti a diversi ambiti tecnologici, a cavallo tra hardware e software. Possiamo quindi procedere nello scomporre il dominio applicativo in differenti macro aree:

Acquisizione: Astrazione di dispositivi di acquisizione eterogenei;

Filtri: Filtri di miglioramento dell'immagine;

Test ottici: Algoritmi composti per la realizzazione di task ricorrenti nell'ispezione ottica automatica;

Persistenza: Gestione dei formati di memorizzazione di video/immagini;

Conversione: Conversione tra spazi di colore, diversi formati di pixel;

Gui: Controlli per l’interazione uomo macchina e la visualizzazione dei risultati degli algoritmi di visione;

5.1.1 Acquisizione

In un contesto industriale differenti dispositivi possono essere impiegati per acquisire immagini quali: telecamere matriciali, lineari o dispositivi di *imaging* 3D; Differenti protocolli di comunicazione sono disponibili sul mercato; Spesso i dispositivi espongono interfacce eterogenee, difficili da generalizzare in un unica logica di utilizzo oppure espongono funzionalità peculiari; Altrettanto spesso i dispositivi di acquisizione sono accoppiati con un *triggering* fornito da dispositivi HW per tanto l’utilizzo di tali sensori richiede l’interazione con altri moduli.

5.1.2 Filtri

Il miglioramento dell’immagine iniziale porta ad un vantaggio nella successiva fase di elaborazione, spesso le immagini acquisite da sistemi industriali presentano rumore o effetti non voluti che possono essere attenuati da un accurato filtraggio. L’utilizzo combinato di tecniche di acquisizioni sofisticate (HDR, aumento della gamma dinamica) con i filtri può portare ad un miglioramento del rapporto segnale rumore. I filtri possono essere utilizzati anche per evidenziare determinate caratteristiche salienti nell’immagine al fine di semplificare un’ispezione ottica umana.

5.1.3 Test ottici

Alcune categorie di ispezione ottica possono essere generalizzate in degli approcci chiavi in mano basati su differenti idee di fondo. Per esempio, la localizzazione di un punto di calibrazione può avvenire per mezzo di approcci basati su “pattern matching”; il riconoscimento di oggetti colorati può avvenire per mezzo di misure valutate in opportuni spazi di colore; Una libreria di visione industriale per tanto conterrà quanti più algoritmi di semplice utilizzo e relativa potenza.

5.1.4 Persistenza

La persistenza dei dati su disco è un altro aspetto importante della visione industriale, spesso i dati registrati dai sistemi di ispezione ottica devono essere integrati in database per il computer integrated manufacturing (CIM) e per tanto diversi formati di input output vanno gestiti e spesso essi vanno corredata di dati complementari alla sola immagine. Sono proprio i metadati a documentare e oggettivare un’ispezione ottica ripetibile, per tanto le immagini vengono spesso corredate dai parametri utilizzati per l’acquisizione o dagli esiti delle fasi del test.

5.1.5 Conversione

Differenti dispositivi producono dati in formati differenti o in spazi di colore alternativi al comune spazio RGB, per tanto è necessario un modulo in grado di tradurre le rappresentazioni in ingresso in una rappresentazione omogenea per i processi che avverranno a valle della conversione. Oltre che differenti spazi di colore anche differenti codifiche dei dati dovranno essere gestite quali codifiche sotto-campionate su alcuni canali o con differente disposizione in memoria.

5.1.6 Gui

L’interazione uomo macchina è fondamentale nell’applicazione all’industria, i risultati presentati dai sistemi di ispezione devono essere chiari e soprattutto devono catturare l’andamento statistico e le eventuali derive dei processi produttivi, per tanto componenti di visualizzazione sia di immagini che di dati statistici sono necessari alla realizzazione di sistemi efficienti.

5.2 Requisiti

In ingegneria del software, l’analisi dei requisiti (talvolta detta semplicemente analisi) è un’attività preliminare allo sviluppo (o alla modifica) di un sistema software, il cui scopo è quello di definire le funzionalità che il nuovo prodotto (o il prodotto modificato) deve offrire, ovvero i requisiti che devono essere soddisfatti dal software sviluppato.[12]

Procediamo in questa sezione all’analisi dei requisiti per ogni macro area precedentemente individuata nel dominio applicativo.

5.2.1 Acquisizione

La gestione dei dispositivi di acquisizione rappresenta uno dei compiti più critici di un software di visione industriale poichè questo modulo deve accomodare quanto più possibile la sostituzione di un dispositivo con uno di capacità equivalenti, risulta quindi necessario esplorare i seguenti requisiti.

Semplice sostituzione dei dispositivi di acquisizione

La gestione dei dispositivi di acquisizione deve avvenire in maniera generica, telecamere di produttori diversi ma di medesima natura devono essere esposte e gestite dalla libreria di visione in maniera omogenea, astraendo il programmatore da eventuali peculiarità di configurazione della telecamera.

Scoperta dinamica dei dispositivi di acquisizione

Spesso un sistema di visione industriale viene aggiornato per adeguarlo ad una nuova applicazione o lo stesso sistema può lavorare con un numero differente di siti di acquisizione

immagine, è opportuno quindi prevedere un meccanismo di scoperta automatico dei dispositivi di acquisizione che possa interrogare le varie interfacce supportate riguardo la presenza di dispositivi compatibili e che possa associare gli stessi alla funzione e/o alla posizione all'interno del sistema

Gestione generica dei parametri dei dispositivi

Spesso produttori diversi espongono funzionalità e/o parametri simili in maniera leggermente diversa, per tanto la libreria di visione dovrà stabilire una semantica consistente di alcune parole chiave del settore (per esempio “tempo di esposizione”) e adottarla in maniera consistente gestendo parametri simili in maniera omogenea.

Gestione del trasferimento dati

Ogni dispositivo trasferisce i dati secondo sequenze di operazioni diverse, bisogna prevedere delle trame di esecuzione indipendenti per ogni dispositivo in modo che possano ciascuna gestire differenti code di acquisizione. È opportuno che la libreria incapsuli le operazioni di acquisizione e che gestisca correttamente, in maniera veloce ed affidabile, le politiche di acquisizione necessarie (per esempio con buffer, scartando i frames non gestiti, con buffer a lunghezza fissa).

Organizzazione in driver

Ogni categoria di dispositivo deve essere gestita da un sottosistema omogeneo, basato sullo stesso SDK di acquisizione. Tale sottosistema deve essere in grado di distinguere le peculiarità di modelli diversi pilotati tramite lo stesso driver oltre che di uniformarne il comportamento.

Gestione di segnali HW esterni

Spesso i dispositivi di acquisizione presentano la possibilità di essere triggerati da dispositivi esterni o di pilotare sistemi di illuminazione sincronizzata tramite dei segnali hardware. Queste funzionalità devono essere gestite in maniera omogenea per dispositivi differenti.

5.2.2 Filtri

La gestione dei filtri permette di migliorare la catena di acquisizione riducendo il rumore o esaltando caratteristiche salienti. Nascono quindi i seguenti requisiti:

Gestione di catene di filtri

I filtri devono essere liberamente componibili in catene, un approccio più evoluto e organizzato sotto forma di grafo porta alla realizzazione di veri e propri sistemi generici e grafici di connessione di filtri, per tanto i filtri devono esporre un interfaccia generica e comune, standardizzando la pubblicazione delle loro capacità.

Filtraggio in place

Quando vengono gestite immagini contenenti un elevato numero di dati la memoria rappresenta un reale collo di bottiglia per tanto molti filtri possono essere progettati per lavorare non su una copia dell'immagine ma sullo stesso spazio di memoria in ingresso, i filtri devono essere in grado di pubblicare la possibilità di operare in-place ed il client deve essere in grado di richiederne questa particolare modalità.

Passthrough

I filtri devono essere liberamente disabilitabili in una catena, in questo caso il filtro passa semplicemente il frame corrente a valle.

Formato di interscambio

Le catene di filtri devono essere *serializzabili* e *deserializzabili* su disco per poter essere caricate su qualunque software realizzato tramite l'uso della libreria.

5.2.3 Test ottici

La gestione di test ottici standard prevede la definizione di interfacce comuni per differenti esigenze quali diagnostica, metodo di esecuzione, *logging* dei dati

Logging

Un test ottico deve fornire dei dati di diagnostica sull'esecuzione in modo da informare il programmatore su eventuali criticità riscontrate durante l'esecuzione dell'algoritmo o per fornire dati necessari ad interpretare i risultati, per tanto un interfaccia per il *logging* dei dati da esporre al *client* deve essere realizzata.

Diagnostica

Un test ottico deve fornire, oltre che un *log* testuale, delle immagini di diagnostica che permettano di osservare i passi intermedi di un algoritmo. La generazione di tale output deve essere disabilitabile per non inficiare i tempi di esecuzione dei test.

Metodi

Un test ottico deve esporre la possibilità di essere interrogato sui metodi supportati in modo da offrire la possibilità di eseguire algoritmi diversi a seconda dell'esigenza o deve prevedere degli opportuni punti di estensione per l'inserimento di comportamenti definiti dall'utente.

5.2.4 Persistenza

La persistenza dei dati su disco rappresenta un modulo importante per l'interscambio di informazioni tra software diversi, per tanto si rilevano i seguenti requisiti.

Gestione uniforme di formati immagine diversi

Formati immagini diversi quali jpeg, png, bmp devono essere gestiti in modo trasparente dal modulo di persistenza, eventuali peculiarità dei formati dati devono essere gestite dalla libreria e non esposti al programmatore

Gestione metadati

Metadati quali timestamp, tempo di esposizione, dispositivo di acquisizione o eventuali risultati dei test devono essere salvati e caricati contestualmente ai dati immagine

Decorazione

I meccanismi di persistenza devono supportare la decorazione ovvero l'organizzazione concentrica delle fasi di scrittura/lettura tale da rendere possibile l'estensione del comportamento del sistema di persistenza.

5.2.5 Conversione

Il modulo di conversione rappresenta il punto di convergenza dei dati immagine verso il formato preferenziale da sottoporre agli algoritmi di filtraggio e di test ottico per tanto si individuano i seguenti requisiti:

Conversione tra spazi di colore

Deve essere possibile convertire i dati di un'immagine tra rappresentazioni basate su spazi di colore diversi, deve essere possibile interrogare il sistema di conversione per ottenere un componente in grado di effettuare la conversione specificata

Conversione fra differenti formati di pixel

Deve essere possibile gestire dati immagine con profondità di colore diverse o con un diverso layout in memoria in modo da gestire formati quali YUV422 che prevedono un sotto-campionamento di alcune componenti o altre peculiarità.

5.2.6 Gui

L'interazione uomo macchina deve essere gestita esponendo delle componenti grafiche semplici ed intuitive, per tanto si evidenziano i seguenti requisiti:

Display

È necessario realizzare un componente grafico in grado di gestire la visualizzazione del flusso video proveniente da una telecamera, tale componente deve essere genericamente in grado di ricevere da una sorgente che aderisca all'interfaccia attesa e deve prevedere la possibilità di disegnare forme oppure di annotare l'immagine visualizzata con altri tipi di informazioni.

Gamma

I componenti grafici atti a visualizzare l’immagine devono possedere la capacità di applicare una correzione gamma alle immagini prima dell’effettiva visualizzazione in modo da rendere meglio interpretabile l’immagine visualizzata nonostante il processamento debba avvenire su una rappresentazione lineare del segnale. Questo dovrà avvenire con un implementazione su GPU per non appesantire i calcoli necessari alla pipeline di visione computerizzata.

Interazione

Il componente di visualizzazione delle immagini deve offrire la possibilità di effettuare selezione, zoom, pan e di navigare fra le viste precedentemente selezionate, questo dovrà avvenire con un implementazione su GPU per non appesantire i calcoli necessari alla pipeline di visione computerizzata.

5.2.7 Generali

Oltre a requisiti generati dal dominio applicativo esistono anche requisiti generati dal mercato. è opportuno che librerie legate all’applicazione industriale operino come *middleware*, dove tecnologie diverse possano essere integrate oppure sostituite nel momento in cui rappresentano un collo di bottiglia. Si individuano i seguenti requisiti:

Architettura basata su provider

L’architettura della libreria di visione sarà basata sul concetto di provider, uno strato procedurale che rappresenta l’interfaccia necessaria ad adattare l’attuazione delle procedure di una libreria di image processing particolare alla dinamica del funzionamento della libreria di visione. Ciò permette di sostituire o aggiungere primitive provenienti da toolkit di visione differenti quali opencv o cognex vision pro utilizzandole senza preoccuparsi del marshaling dei dati tra rappresentazioni proprie di ciascuno.

5.3 Scelte progettuali

Finita l’analisi dei requisiti è necessario cominciare a costruire uno stack di tecnologie solide su cui basare la realizzazione della libreria di visione, per tanto in questa sezione verranno illustrate le scelte effettuate.

5.3.1 Linguaggio di programmazione

Lo sviluppo in ambito industriale prevede bassi tempi di integrazione e di sviluppo delle applicazioni di test, ma contemporaneamente alte prestazioni di elaborazione. Le due esigenze si ritrovano fortemente in disaccordo tra loro, è proprio per questo che nella realizzazione del lavoro oggetto di tesi si è considerato di utilizzare una programmazione di tipo poliglotta, ovvero basata su differenti linguaggi di programmazione. Il linguaggio di

programmazione selezionato per la realizzazione dello strato client della libreria è il C#, linguaggio gestito appartenente famiglia dei linguaggi aventi come target il runtime .net. I linguaggi gestiti sono spesso evitati per la realizzazione di sistemi ad alte performance ma possono essere utilizzati per esporre lo strato di livello più alto in modo che la programmazione sia rapida. Il linguaggio C# è utilizzato per la realizzazione delle componenti grafiche e dell’infrastruttura orientata agli oggetti. Il linguaggio di programmazione selezionato per la realizzazione dello strato di processamento della libreria è il c++, grazie alla presenza delle estensioni microsoft c++/cli risulta semplice da integrare nell’infrastruttura gestita del runtime .net e la disponibilità di librerie di image processing realizzate in c++ o che forniscono dei bindings verso di esso rappresenta un vantaggio considerevole.

5.3.2 Tecnologie utilizzate

Per lo sviluppo delle componenti della libreria di visione sono state utilizzate tecnologie tra loro molto diverse fra cui

WPF

Windows Presentation Foundation (o WPF), nome in codice Avalon, è una libreria di classi del Framework .NET proprietarie Microsoft (introdotta con la versione 3.0) per lo sviluppo dell’interfaccia grafica delle applicazioni in ambienti Windows.

L’innovazione principale di WPF è la rimozione di ogni legame con il modello di sviluppo tradizionale di Windows, introdotto con la versione 1.0 del sistema operativo. Tutti i controlli sono stati riscritti (non si appoggiano più a quelli della libreria “user”) e lo stesso meccanismo basato su scambio di messaggi, cuore del modello di programmazione di Windows, è stato abbandonato.

WPF è basato su un sistema di grafica vettoriale che si appoggia alle DirectX per sfruttare l’accelerazione hardware delle moderne schede grafiche. WPF può essere impiegato per realizzare applicativi eseguibili anche all’interno del browser Microsoft Internet Explorer o di altri browser avanzati, purché sia presente il Framework. Il linguaggio usato per la creazione di una interfaccia utente in WPF è lo XAML (eXtensible Application Markup Language), basato su XML.

Tale toolkit grafico è stato selezionato per essere utilizzato nella realizzazione di questa libreria di visione poichè offre una gestione evoluta di tutte le problematiche di presentazione, infatti, esso offre punti di estensione per la scrittura di pixel shader da eseguire sulla scheda grafica, offre la possibilità di applicare trasformazioni geometriche arbitrarie ai controlli grafici permettendo quindi di gestire sistemi di coordinate arbitrarie (mondo, immagine) e tramite la definizione di template per i dati di presentare in maniera uniforme informazioni a corredo dell’ispezione ottica

Opencv

Il framework OpenCV nasce da una iniziativa dell’Intel, mentre lavorava su miglioramenti delle loro CPU per applicazioni intensive, ad esempio ray-tracing in tempo reale e proiezione 3D. Uno degli addetti della Intel, aveva notato come in molte università, tra cui il

MIT Media Lab fosse stato realizzato un framework di visione, il cui codice era passato da studente a studente. A tal proposito si decise di iniziare, a partire da questo codice, un framework per la computer vision ottimizzato per i processori Intel. Il primo avvio di tale progetto, con la collaborazione di un team Intel russo, fu nel 1999. La prima release ufficiale di OpenCV risale, invece, al 2006. OpenCV è stato selezionato per la disponibilità di un elevato numero di primitive di image processing, l'ottimizzazione degli algoritmi tramite librerie per il calcolo, la disponibilità del supporto al gpu computing e la genericità e flessibilità del modello di programmazione dallo stile modern c++.

5.4 Architettura

Dopo la raccolta dei requisiti procediamo alla definizione dell'architettura della libreria.

5.4.1 Allocazione degli assembly

Una volta identificate le macro aree di interesse all'interno del dominio applicativo procediamo ad allocare gli spazi dei nomi e gli assembly alle relative funzionalità

Spea.Vision.Core

Questo assembly con relativo namespace conterrà le classi le interfacce e i tipi primitivi necessari al funzionamento delle altre aree della libreria.

Spea.Vision.Drivers

I driver di acquisizione verranno implementati all'interno di questo namespace, ogni driver verrà realizzato come assembly separato in modo che le dipendenze da eventuali sdk esterni non debbano sempre essere presenti sui sistemi dove la libreria verrà impiegata. Ciò promuove la composizione delle funzionalità basata sui reali bisogni dell'applicazione finale.

Spea.Vision.Filters

I filtri di miglioramento ed elaborazione delle immagini risiederanno in questo assembly. Eventuali filtri peculiari di una libreria di image processing supportata come backend andranno implementati in un assembly separato avente come suffisso Estensione.NomeVendor (es. Spea.Vision.Filters.Extensions.Cognex).

Spea.Vision.OpticalTest

I test ottici realizzati risiederanno in questo assembly. È favorevolmente consigliata la creazione di una sotto gerarchia per differenziare i test ottici di applicazione generale da quelli specifici per un componente. Nel caso di estensioni supportate solo da un determinato backend, similmente a quanto realizzato per i filtri, andranno implementate in un assembly separato avente come suffisso Extensions.NomeVendor (es. Spea.Vision.OpticalTest.Extensions.Cognex).

Spea.Vision.Converters

I convertitori tra formati di pixel o spazi di colori differenti risiederanno in questo assembly e seguiranno la convenzione di nomenclatura FromToPixelFormatConverter (Es. BayerBG8ToRgb24PackedPixelFormatConverter).

Spea.Vision.Controls

I componenti grafici (Controlli) risiederanno in questo assembly, eventuali integrazioni con toolkit grafici diversi da Wpf andranno implementati in assembly aventi come suffisso la tecnologia utilizzata (Es. Spea.Vision.Controls.WinForms).

Spea.Vision.Persistence

Le classi utilizzate per la persistenza dei dati risiederanno in questo assembly.

5.4.2 Provider

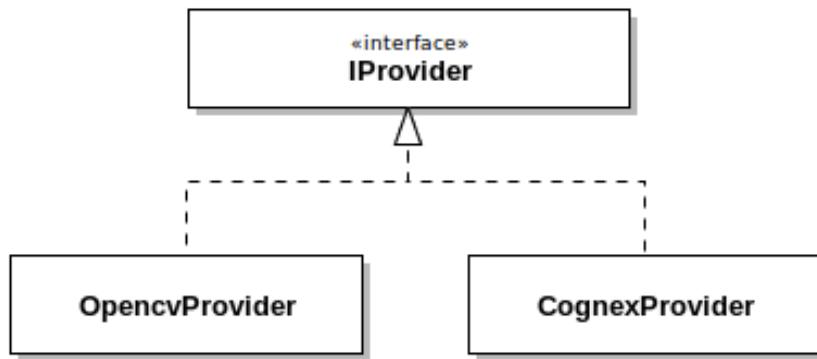


Figura 5.1: Provider.

La libreria è stata realizzata per favorire l'integrazione rapida di tecnologie diverse nell'infrastruttura dei sistemi di visione SPEA. Rendere disponibile la possibilità di agganciare un backend diverso per l'image processing permette la sostituzione di prodotti commerciali già integrati con nuovi più economici, flessibili o efficaci. Si è scelto di soddisfare questo requisito a partire da un interfaccia, ovvero un contratto con l'implementatore di un backend contenente tutti i metodi da supportare, ciò rende esplicita la superficie di separazione tra la libreria Spea.Vision ed il back-end di processamento. L'implementazione dei metodi viene forzata dal compilatore ed un meccanismo di delega può essere implementato verso un provider di default, permettendo la costruzione incrementale di un provider basato su una libreria differente.

Questa scelta si è dimostrata vincente permettendo di rispondere all'esigenza di implementare un provider basato su librerie Cognex Vision pro atto alla risoluzione di un task

particolarmente oneroso. Ciò è stato ottenuto semplicemente delegando la maggior parte delle operazione al provider esistente e implementando le operazioni sensibili.

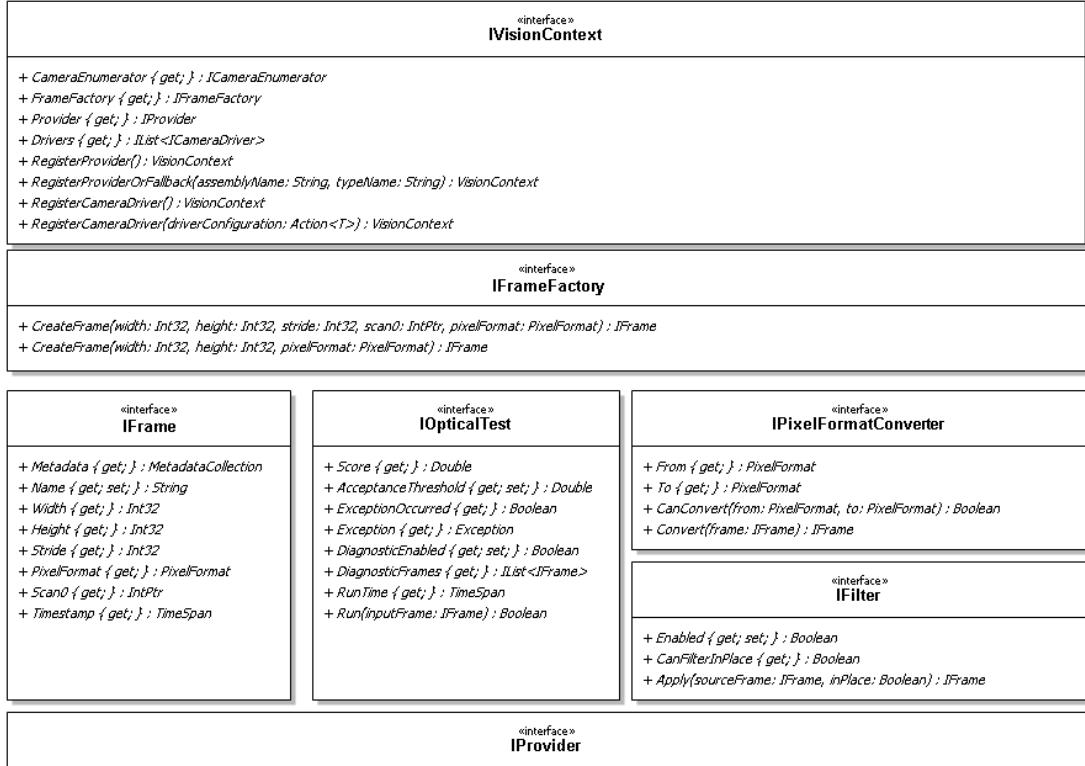


Figura 5.2: Spea.Vision.Core

5.4.3 VisionContext

L'entry point della libreria è rappresentato dal VisionContext, tale classe è responsabile della registrazione dei driver di acquisizione, dell'aggregazione dei meccanismi di accesso alle telecamere, della gestione di un factory in grado di costruire i frames e dell'accesso al provider procedurale, questa classe è implementata come singleton e viene interrogata da ogni classe che necessita di comunicare o interagire con altri moduli. per la registrazione e la configurazione dei moduli si è optato per la creazione di un interfaccia fluida.

Listing 5.1: Configurazione provider

```

VisionContext.Default
    .RegisterCameraDriver<BaslerCameraDriver>(driver =>
{
    driver.EnableJumboFrames = true;
    driver.EnableTestImage = false;
    driver.LimitFps = false;
}

```

```
    driver.Fps = 5;  
}  
).RegisterProvider<OpenCVProvider>();
```

5.4.4 Interfaccia fluida

In ingegneria del software, un’interfaccia fluida (come coniato da Eric Evans e Martin Fowler [6]) è un’implementazione di un API orientata agli oggetti che mira a fornire codice più leggibile.

Una interfaccia fluida viene normalmente implementato utilizzando la concatenazione di metodi per trasmettere il contesto di esecuzione all’invocazione di una chiamata successiva.

Listing 5.2: Esempio di interfaccia fluida

```
var translations = new Dictionary<string, string>
{
    {"cat", "chat"},  
    {"dog", "chien"},  
    {"fish", "poisson"},  
    {"bird", "oiseau"}  
};  
  
// Find translations for English words containing  
// the letter "a", sorted by length and displayed  
// in uppercase  
IEnumerable<string> query = translations  
    .Where (t => t.Key.Contains("a"))  
    .OrderBy (t => t.Value.Length)  
    .Select (t => t.Value.ToUpper());
```

5.4.5 Acquisizione

Per definire un meccanismo uniforme di accesso ai dispositivi di acquisizione è stata creata una gerarchia di classi basata su tre concetti principali, il driver, l’enumeratore e la telecamera.

Driver

Un driver rappresenta il conduttore di un set omogeneo di dispositivi, esso incapsula la logica di set-up e tear-down imposta dagli sdk associati ai dispositivi e la configurazione di proprietà globali di tutti i dispositivi condotti dal driver.

Camera enumerator

Un enumeratore rappresenta un entità capace di scoprire i dispositivi connessi e fornirli all’utente, le istanze degli enumeratori saranno aggregate in un `AggregateCameraEnumerator`

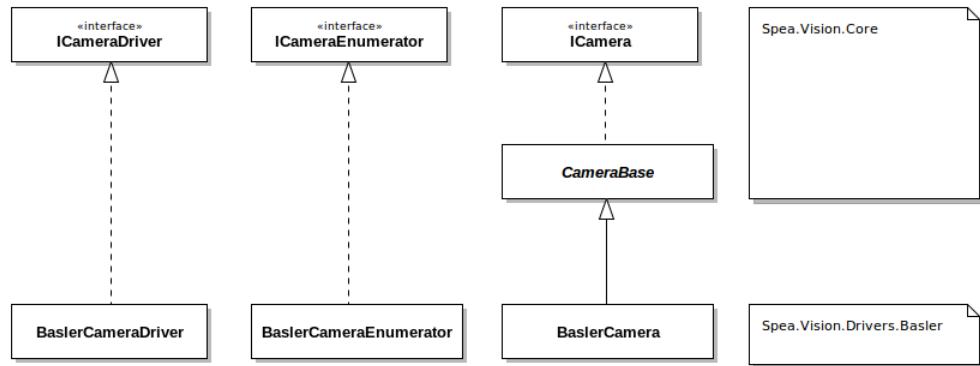


Figura 5.3: Acquisizione.

ICameraDriver <pre>+ Name {get; } : String + Description {get; } : String + Enumerator {get; } : ICameraEnumerator</pre>			
ICameraEnumerator <pre>+ All() : IEnumerable<ICamera></pre>			
ICameraParametersCollection <pre>+ this[String name] {get; } : ICameraParameter + ApplyParameters() : Boolean + Refresh() : Boolean</pre>	ICamera <pre>+ IsOpen {get; } : Boolean + Info {get; } : CameraInfo + IsGrabbing {get; } : Boolean + CameraParameters {get; } : ICameraParametersCollection + Filters {get; } : IList<IFilter> + SupportedPixelFormats {get; } : IEnumerable<PixelFormat> + SupportedGrabModes {get; } : IEnumerable<GrabMode> + PixelFormat {get; set; } : PixelFormat + GrabMode {get; set; } : GrabMode + Width {get; } : Int32 + Height {get; } : Int32 + Commands {get; } : ICameraCommands + FrameReceived : FrameReceivedEventHandler + Open() : Boolean + Start() : Void + Stop() : Void + Trigger() : Void + GetNextFrame() : JFrame + ConsumePendingFrames() : Void</pre>	ICameraCommands <pre>+ this[String command] {get; } : ICameraCommand</pre>	ICameraCommand <pre>+ Name {get; } : String + CanExecute {get; } : Boolean + Description {get; } : String + Execute() : Void</pre>
ICameraParameter <pre>+ Name {get; } : String + Description {get; } : String + Value {get; set; } : IConvertible + IsApplied {get; set; } : Boolean + MeasurementUnit {get; } : MeasurementUnit + Range {get; } : Range?</pre>			

Figura 5.4: Spea.Vision.Core - Acquisizione

che rappresenta il singolo punto di accesso a tutti i dispositivi connessi gestibili dai driver registrati.

Camera

Un oggetto di tipo **Camera** rappresenta il dispositivo fisico ed incapsula il codice necessario a interrogalo o inviargli comandi. Ogni oggetto camera deve almeno implementare le operazioni definite nell’interfaccia **ICamera** (che funge per tanto da contratto) includendo le operazioni di:

- Selezione del formato pixel;
- Selezione della modalità di acquisizione;
- Triggering dell’acquisizione;
- Gestione dei parametri;

5.4.6 Filtri

I filtri sono una componente importante di una libreria di image processing poiché permettono, a volte, di aggirare i limiti del sistema di visione. I filtri migliorano la qualità dell’immagine o evidenziano le caratteristiche di interesse di un’immagine, ciò permetterà di avere un’ispezione ottica pronta e robusta, che sia influenzata il meno possibile da rumore o caratteristiche indesiderate dell’immagine acquisita e/o del dispositivo da ispezionare.

Durante il percorso di tesi sono state implementati i seguenti filtri di cui si da una breve descrizione:

AdaptiveThreshold Implementa un sistema di binarizzazione a soglia adattiva, la soglia viene valutata in intorni di dimensione definita dall’utente.

ArithmeticOperation Implementa operazioni matematiche pixel per pixel (somma, sottrazione, prodotto, divisione), utili per eliminare regioni indesiderate.

Schaar Implementa l’estrazione del gradiente (in rappresentazione polare, un’immagine per i moduli, una per le fasi) dell’immagine utilizzando l’operatore di Schaar, utile come primo stadio per l’edge detection o per esaltare le alte frequenze.

Morphology Implementa operazioni morfologiche con estensione alla scala di grigi, supporta Erosione, Dilatazione, Apertura, Chiusura e Gradiente morfologico.

BackgroundSubtraction Implementa la sottrazione dello sfondo da uno stream video sfruttando l’algoritmo proposto da Zivkovic[13]

ContourRemover Rimuove componenti connesse (blob o ammassi di pixel connessi) a partire dalle caratteristiche geometriche, utile per rimuovere caratteristiche non volute dell’immagine.

Crop Ritaglia la regione di interesse impostata.

Resize Ridimensiona il frame alle dimensioni specificate.

Flip Specchia il frame lungo l'asse specificato.

Rotate Ruota il frame dell'angolo specificato intorno all'asse di simmetria passante per il baricentro.

UnsharpMask Esalta le alte frequenze in modo da evidenziare dettagli altrimenti sfocati.

CannyEdgeDetector Implementa un rilevatore di bordi basato sull'algoritmo di Canny[3].

OtsuThreshold Implementa un algoritmo di binarizzazione basato su una scelta automatica della soglia a partire dalle caratteristiche dell'istogramma come proposto da Otsu [1].

Blur Implementa un algoritmo di sfocatura basato su un kernel di convoluzione ottenuto discretizzando una gaussiana in una finestra centrata sulla media.

EqualizeHistogram Equalizza l'istogramma delle intensità, espande la gamma dinamica dell'immagine o annulla eventuali offset per histogrammi con stessa forma, utile per compensare offset uniformi di luminosità.

BitwiseOperation Implementa operazioni boolean pixel per pixel (AND, OR, NOT), utili per mascherare aree non utili o dannose dell'immagine.

LaplacianSharpening Esalta le alte frequenze, basato su derivate del secondo ordine.

HoughLine Rilevatore di rette, questo filtro è basato su la trasformata di Hough[5].

Sharpness Posto in una catena di filtri non altera l'immagine ma bensì produce un valore stima della messa a fuoco.

Threshold Implementa un algoritmo di binarizzazione a soglia fissa, sono supportate differenti funzioni soglia.

GammaCorrection Implementa la correzione gamma sRGB diretta e inversa, essendo questo processo legato esclusivamente alla visualizzazione finale dell'immagine questo filtro è stato sostituito da un pixel shader implementato su GPU

PixelFormatConverter Adatta un PixelFormatConverter ad essere utilizzato come filtro

5.4.7 Test Ottici

I test ottici rappresentano il cuore di un sistema AOI per tanto si è voluto generalizzare alcune tecniche in dei moduli di test ottico liberamente componibili, volti a realizzare un'applicazione di ispezione automatica.

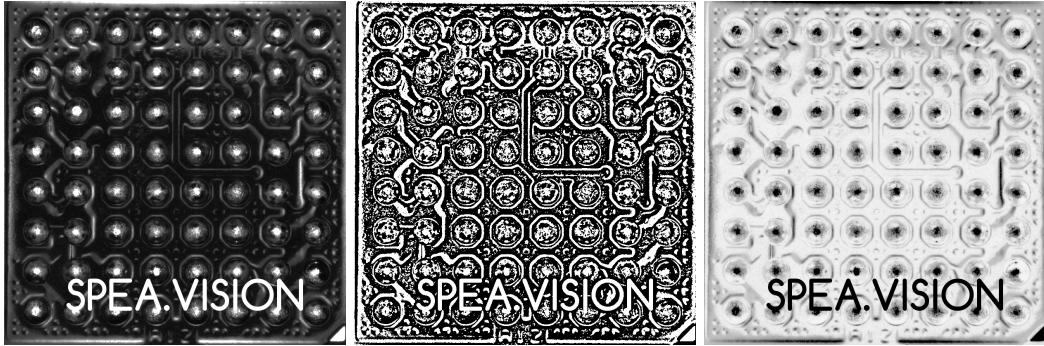


Figura 5.5: Originale - Binarizzazione adattiva - Operazione bitwize(NOT)



Figura 5.6: Originale - Sfocatura - Canny Edge Detector

Template matching

La ricerca di un template all'interno dell'immagine dell'area di ispezione rappresenta uno dei task più comuni di visione associata all'ispezione ottica automatica, è stato per tanto implementato un algoritmo basato sullo pseudocodice riportato nel listato 5.3. La metrica di similarità calcolata è:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{x',y'}(T(x', y') \cdot I(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x',y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x',y'} I(x + x', y + y')^2}}$$

Analisi delle componenti connesse

Questo test è stato sviluppato per permettere di analizzare, dopo il processo di binarizzazione, gli agglomerati di pixel connessi tra di loro con un'opportuna nozione di connettività in modo da individuare aree significative. Presenza o assenza di queste aree rappresenta un input alla decisione dell'esito dell'ispezione ottica.

Listing 5.3: Pseudocodice template matching

```
trovaTemplate(template, immagine)
{
    var x,y
    mappaDiSimilarita

    for(y = 0; y<immagine.height, y++)
    {
        for(x = 0 ; x<immagine.width; x++)
        {
            mappaDiSimilarita(x,y) =
                calcolaSimilaritaPosizionandoTemplate(template,immagine,x,y)
        }
    }

    trovatoA = cercaCoordinateMassimo(mappaDiSimilarita)
    confidenza = valoreAlleCoordinate(mappaDiSimilarita,x,y)

    return [trovatoA, confidenza]
}
```



Figura 5.7: Originale - Rimozione componenti connesse - Equalizzazione dell'istogramma

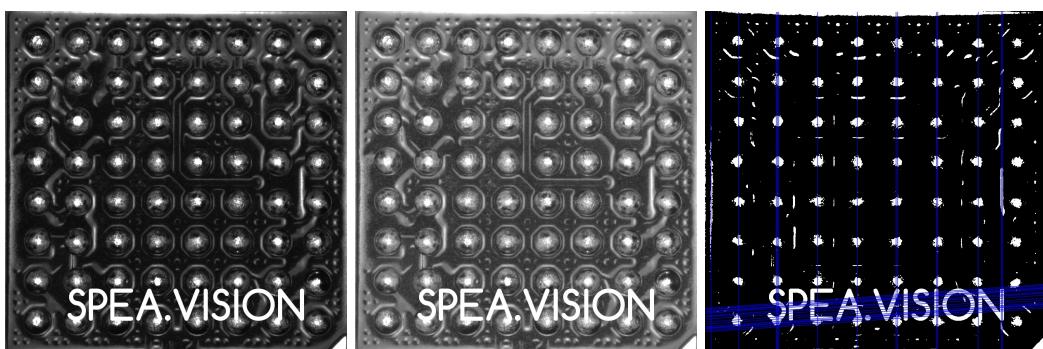


Figura 5.8: Originale - Correzione Gamma - Trasformata di Hough

Test componenti SMT

Questo insieme di test è stato sviluppato per coprire una famiglia di componenti surface mount frequentemente presenti sulle schede elettroniche da collaudare, l'algoritmo di ricerca del condensatore è già stato descritto nel capitolo sulle macchine di collaudo SPEA (4.3.1)

5.5 Spea Optical Test App

Optical Test App è un software per la creazione, esecuzione, modifica e debug visuale dei test ottici specificamente concepita per lo sviluppo degli stessi su sistemi SPEA. I test ottici realizzati tramite l'uso di questa applicazioni possono essere modificati dal cliente senza l'intervento di tecnici SPEA per tanto rappresenta un valore aggiunto quando un sistema dotato di stazioni di test ottico viene venduto al cliente poiché soprattutto nella fase di avviamento della linea di collaudo le specifiche dei dispositivi da testare possono variare. L'applicazione può essere utilizzata per sviluppare test ottici da eseguire sui sistemi di collaudo dotati di hardware di visione GigeVision.

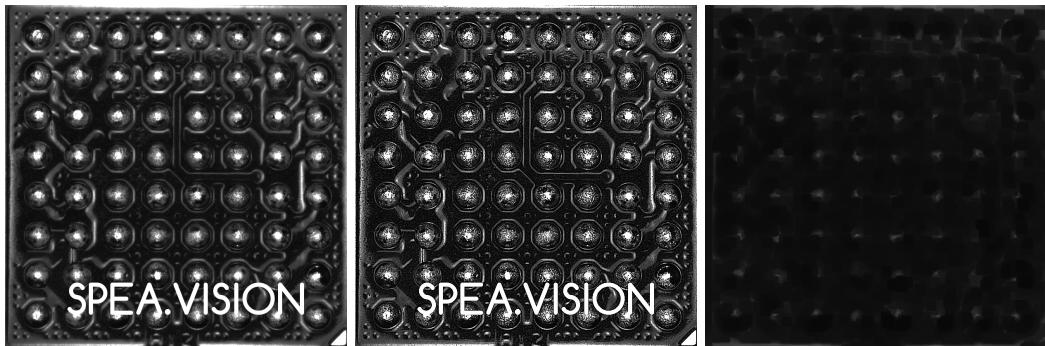


Figura 5.9: Originale - Sharpening Laplaciano - Morfologia (erosione)

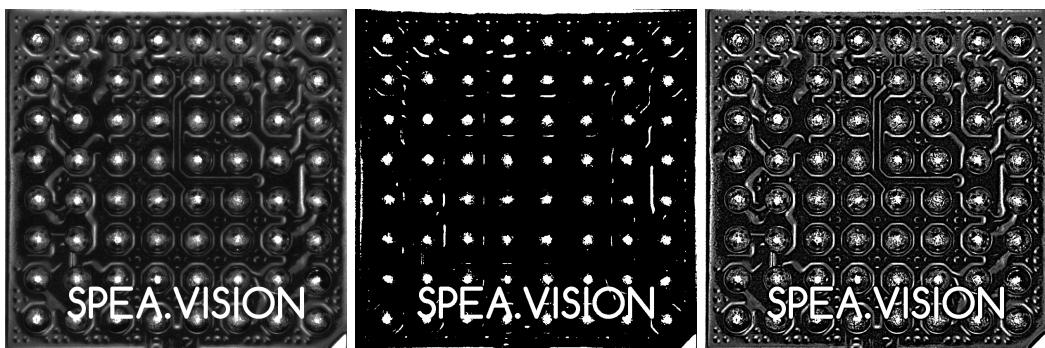


Figura 5.10: Originale - Binarizzazione alla Otsu - Unsharp mask

5.5.1 Principio di funzionamento

Costruendo un ulteriore livello sulla libreria Spea.Vision Optical Test App (OPTA) si avvale di un'esecuzione basata su grafi: filtri, convertitori di formato, test ottici vengono esposti sotto forma di blocchi dotati di ingressi e uscite componibili visualmente dall'utente disegnando degli archi fra i nodi del grafo. L'interazione descritta è rispecchiata nella struttura dati che governa l'esecuzione del test ottico: un grafo i cui nodi costituiscono ingressi e uscite dei blocchi e gli archi il flusso dei dati tra questi terminali. L'organizzazione sotto forma di grafo permette di usare opportuni algoritmi di visita per realizzare delle strutture dati derivate (come il grafo delle dipendenze) da cui viene inferito l'ordine corretto di esecuzione dei blocchi.

5.5.2 Ambiente di verifica

Poichè la realizzazione di un test ottico volto all'applicazione industriale prevede la verifica su di una base di dati statistica per garantire che i casi di interesse siano coperti, il software offre all'utente un ambiente di verifica dotato di possibilità di generazione dei report. Tale meccanismo aiuta il tecnico a non introdurre regressioni rilassando o vincolando ulteriormente il test ottico durante la fase di “fine tuning”.



Figura 5.11: Originale -Operatore di Scharr, fasi - moduli

5.5 – Spea Optical Test App

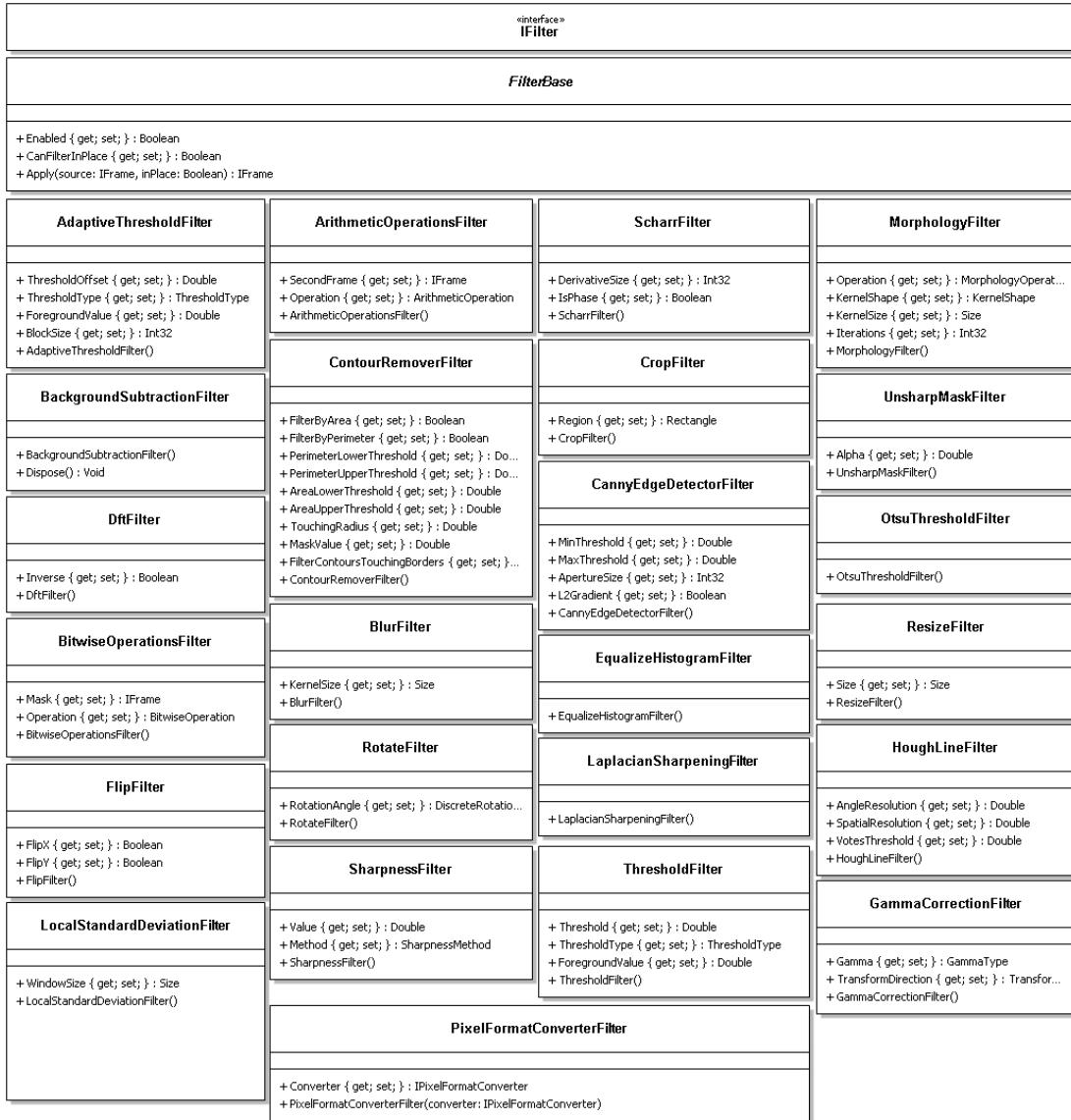


Figura 5.12: Spea.Vision.Filters

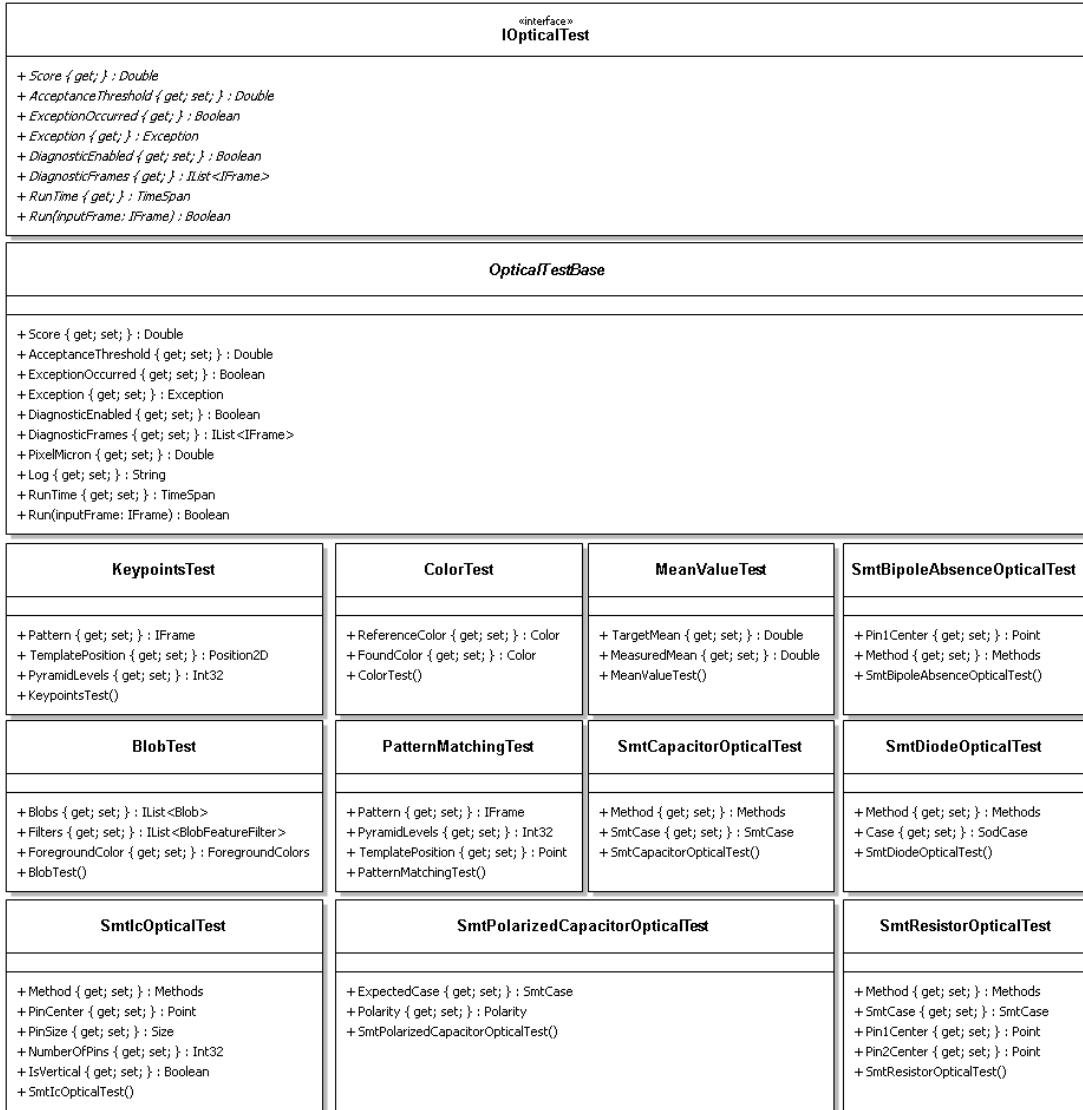


Figura 5.13: Spea.Vision.OpticalTest



Figura 5.14: Optical Test App - Finestra principale



Figura 5.15: Optical Test App - Pannello di verifica

Capitolo 6

Conclusioni

Molti dei problemi odierni nell'applicazione dei sistemi AOI al controllo qualità deriva dalla limitata intelligenza e flessibilità degli stessi, un uomo è in grado di prendere una parte, esaminarla da diverse angolazioni e condizioni di luce, elaborare le informazioni acquisite e quindi esporre un proprio giudizio basato sulla propria conoscenza dell'oggetto ispezionato o del materiale con cui è fabbricato: ciò da un punto di vista computazionale è da paragonare all'intelligenza artificiale.

Un sistema AOI dipende attualmente da una costruzione artificiale di un *palcoscenico* su cui la parte da ispezionare viene presentata, non è in grado di comprendere intimamente la parte ispezionata o il fine dell'ispezione.

Il miglioramento delle tecniche di illuminazione, della capacità computazionale e del software di visione ha reso sempre più intelligenti e flessibile l'ispezione ottica automatica ma sempre lontana dall'intelligenza visiva umana.

Funzionalità AOI che nel passato richiedevano hardware specializzato sono adesso realizzabili con elaboratori general purpose. L'ispezione ottica automatica presenta molte applicazioni ma è attualmente limitata all'individuazione di difetti visivi su parti specificate in maniera precisa ed in condizioni ben definite, possibile sviluppo futuro sarà la realizzazione di sistemi sempre più flessibili coadiuvati da tecniche di machine learning, ciò porterebbe alla nascita di stazioni di test aventi la facilità di apprendimento di un uomo ma la velocità, l'accuratezza e la risoluzione di un elaboratore.

Attualmente grazie alla standardizzazione di alcune tecniche di illuminazione e di posizionamento dell'oggetto si osserva la nascita sempre più veloce di pacchetti chiavi in mano privi di programmazione che possono contenere in maniera significativa i tempi di sviluppo di applicazioni custom.

Dopo l'anno 2000 con l'aumentare dell'integrazione dell'hardware e della conseguente riduzione degli spazi, vediamo affermarsi la categoria di sistemi di visione compatti chiamati smart-camera. Fondamentalmente non c'è nessuna variazione qualitativa rispetto ai sistemi basati su PC, ma solo un aumento di praticità. Dopo l'anno 2005 compaiono i primi sistemi integrati di visione che sfruttano a pieno la sempre maggiore potenza dei personal computer utilizzando software ad alto livello che usa logiche ibride. Questi sistemi di visione hanno, diversamente dai sistemi classici, un alto livello di adattabilità agli

eventi esterni che li rendono decisamente più affidabili e versatili. Questi sistemi sono decisamente più semplici da usare perché risolvono automaticamente alcune problematiche tipiche della visione artificiale, lasciando all'operatore l'incombenza di configurare solo gli aspetti funzionali del sistema.

Durante il percorso di tesi sono stati esplorati diversi e complementari aspetti della visione industriale dal momento che la realizzazione di sistemi *AOI* è un'attività che coinvolge ottica, automazione, processamento di immagini e apprendimento automatico.

Obiettivo di questo lavoro è stato per tanto proporre non solo software per la visione industriale ma anche sensori, interfacce di comunicazione e tecniche di illuminazione.

Nella progettazione e realizzazione della libreria Spea.Vision si è seguito un metodo basato su quanto proposto, analisi dei requisiti, definizione dell'architettura orientata agli oggetti, implementazione delle funzionalità e verifica tramite feedback dall'applicazione ai sistemi di collaudo SPEA.

Possibili sviluppi futuri dell'attività portata a termine durante il percorso di tesi potranno essere l'arricchimento degli algoritmi di processamento di immagini a disposizione dei tecnici SPEA nella realizzazione di programmi di verifica ottica, una ulteriore riduzione del tempo necessario per lo sviluppo, un miglioramento delle prestazioni dei sistemi dotati di stazioni di ispezione ottica e la realizzazione di tecniche di calibrazione ottica necessarie a ottenere le precisioni richieste dai sistemi di ispezione e collaudo per l'industria elettronica.

Bibliografia

- [1] A threshold selection method from gray-level histograms. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 9(1):62–66, Jan 1979.
- [2] Paul André. University of southampton intelligent flood fill or: The use of edge detection in image object extraction, 2005.
- [3] J Canny. A computational approach to edge detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 8(6):679–698, June 1986.
- [4] Jason P. de Villiers, F. Wilhelm Leuschner, and Ronelle Geldenhuys. Centi-pixel accurate real-time inverse distortion correction, 2008.
- [5] Richard O. Duda and Peter E. Hart. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Commun. ACM*, 15(1):11–15, January 1972.
- [6] Martin Fowler. FluentInterface, 2005. <http://martinfowler.com/bliki/FluentInterface.html>.
- [7] Shih-Chieh Lin, Chih-Hsien Chou, and Chia-Hsin Su. A development of visual inspection system for surface mounted devices on printed circuit board. In *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*, pages 2440–2445, Nov 2007.
- [8] David G. Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int. J. Comput. Vision*, 60(2):91–110, November 2004.
- [9] J. R. Parker. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. Wiley Publishing, 2nd edition, 2010.
- [10] Young Jun Roh, Duk-Young Lee, Min-Young Kim, and Hyungsuck Cho. Visual inspection system with flexible illumination and autofocusing, 2002.
- [11] Mehmet Sezgin and Bulent Sankur. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1):146–168, 2004.
- [12] Trung Hung VO. Requirements analysis, 2007. <http://cnx.org/contents/66f6f7f2-5f3f-4665-92c6-c366f513b4d1@6066>.
- [13] Z. Zivkovic. Improved adaptive gaussian mixture model for background subtraction. In *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on*, volume 2, pages 28–31 Vol.2, Aug 2004.