



**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

Questo sarà il sommario della tesi (l'introduzione potrebbe essere ridondante a causa della presenza di questo capitolo speciale)

Indice

Sommario	II
1 Introduzione	1
1.1 Storia	2
1.2 Richiami di ottica	2
1.2.1 Rifrazione - legge di Snell	3
1.2.2 Riflessione	4
1.2.3 Lenti	6
1.2.4 Gli specchi	7
1.2.5 Approssimazione parassiale	8
1.2.6 Aberrazione	8
1.2.7 Aberrazione Sferica	9
1.2.8 Coma	10
1.2.9 Astigmatismo	10
1.2.10 Curvatura di campo	11
1.2.11 Distorsione	11
1.2.12 Aberrazione cromatica	13
1.2.13 Ingrandimento e luminosità	13
1.2.14 La risoluzione	14
2 Sistemi di imaging	15
2.1 Sensori	15
2.1.1 CCD	15
2.1.2 CMOS	17
2.1.3 Caratteristiche di un sensore	18
2.1.4 Standardizzazione delle interfacce di comunicazione	21
2.2 Illuminazione	22
2.2.1 Illuminazione direzionale	22
2.2.2 Illuminazione tangenziale	23
2.2.3 Illuminazione diffusa	23
2.2.4 Illuminazione anulare	23
2.2.5 Illuminazione diffusa assiale	24
2.2.6 Illuminazione strutturata	24

2.2.7	Illuminazione polarizzata	25
2.2.8	Illuminazione dark-field	25
2.2.9	Retroilluminazione (bright-field).	25
2.3	Lenti	26
2.3.1	Terminologia	26
2.3.2	Plano Convex	26
2.3.3	Double Convex	26
2.3.4	Plano Concave	27
2.3.5	Double Concave	27
2.3.6	Acromatica positiva	28
2.3.7	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	Istogramma 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	37
3.1.11	Canny edge detector	38
3.2	Riconoscimento di oggetti	41
3.2.1	Template matching	42
3.2.2	Funzioni per la descrizione dell'immagine	42
3.2.3	Signature	43
3.2.4	Dalla rappresentazione alla descrizione	43
4	Automatic Optical Inspection	45
4.1	Ispezione dei dispositivi elettronici	45
4.1.1	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	48
4.3	Macchine SPEA	49
4.3.1	Flying probes	49
4.3.2	Pick and Place handlers	50

4.3.3	Spea RSU	52
5	Spea.Vision Library	53
5.1	Requisiti	53
5.2	Scelte progettuali	53
5.3	Architettura	53
5.4	Spea Optical Test App	53
6	Caso di studio, VUH160 Ispezione dei contatti su package BGA	55
7	Conclusioni	57

Capitolo 1

Introduzione

Tradizionalmente, l'ispezione visuale ed il controllo qualità sono stati affidati a personale esperto[10]. Nonostante un uomo possa fare questo lavoro meglio di una macchina, l'individuo è più lento e si stanca facilmente, oltretutto 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 computer consente oggi di avere acquisizioni ed analisi delle immagini estremamente rapide, permettendo ai sistemi d'ispezione ottica automatica (AOI) di lavorare su logiche d'ispezione. 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 degli storici statistici e migliorare la tracciabilità; 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 di intercettare i difetti sulla scheda. Il sistema deve essenzialmente trovare i difetti di processo, andando ad evidenziare quando la qualità del processo stia deviando dalle condizioni iniziali. Esistono sistemi di monitoraggio in tempo reale che sono in grado di fermare la linea 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 dei computer 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 novanta 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 costellati di parecchi insuccessi.

Nel 2000-2008 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 of the shelf) adatti ad un utilizzo in ambito industriale aumenta.

1.2 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 1.1 sono

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:

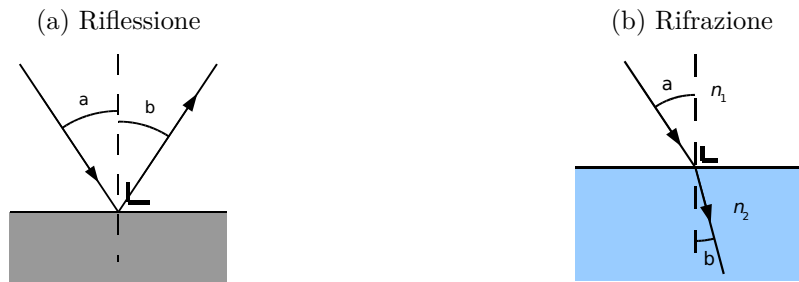


Figura 1.1: Riflessione e rifrazione

1. Nella riflessione (Figura 1.1 – 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 1.1 – 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.

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 1.1: Indici di rifrazione

1.2.1 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 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 1.2 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.

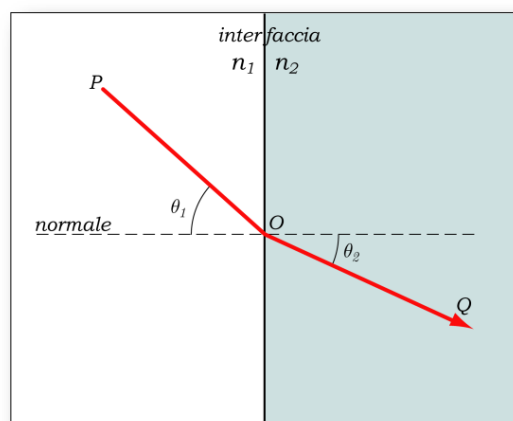


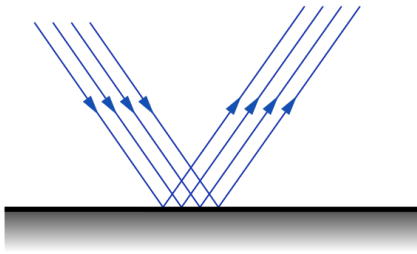
Figura 1.2: Rifrazione

1.2.2 Riflessione

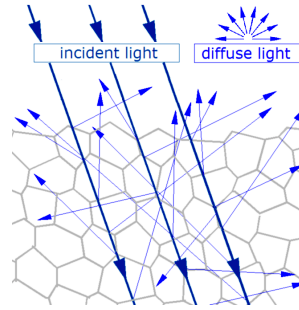
La riflessione è il fenomeno per cui un'onda, che si propaga lungo l'interfaccia tra differenti mezzi, cambia di direzione a causa di un impatto con un materiale riflettente. Assorbimento, riflessione e trasmissione sono i fenomeni che avvengono quando la luce interagisce con la materia. Quando l'energia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

1.2.3 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 1.4 – 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 1.5 – 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 1.4 – 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 1.5 – b) una immagine virtuale, che può essere osservata guardando attraverso la lente, ma che non può essere raccolta su uno schermo.

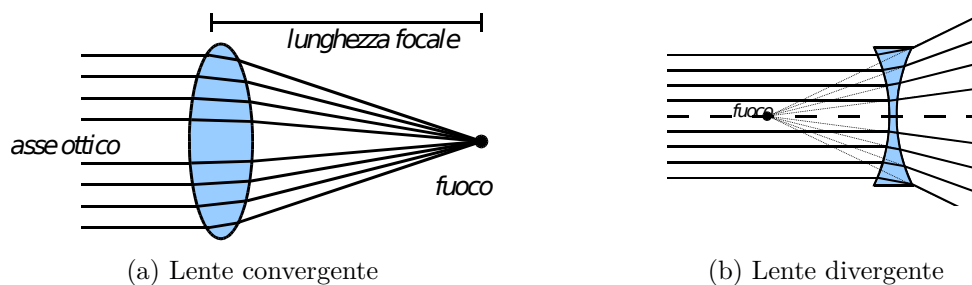


Figura 1.4: Lenti

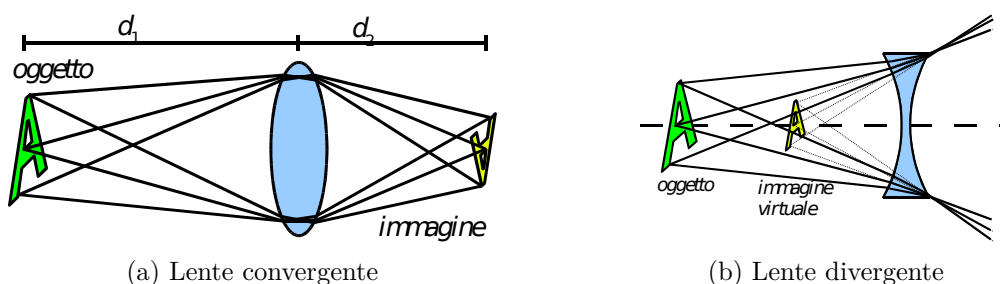


Figura 1.5: Formazione dell'immagine

1.2.4 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 1.6 – a). Lo specchio può essere anche un paraboloide (Figura 1.6 – 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.

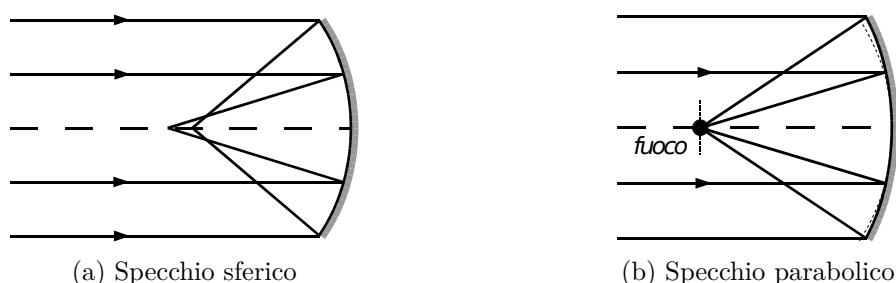


Figura 1.6: Specchi

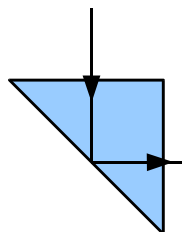


Figura 1.7: Prisma diagonale

1.2.5 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, quindi, 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.

1.2.6 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 legge 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

1.2.7 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.

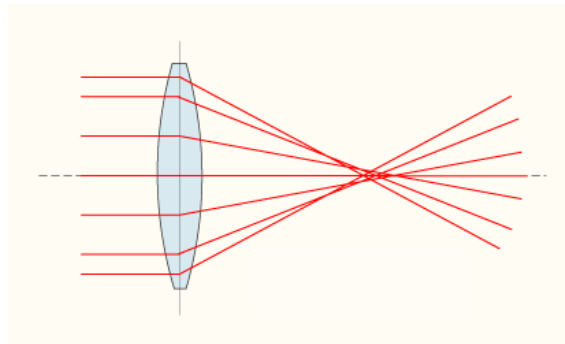


Figura 1.8: Aberrazione sferica

1.2.8 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.

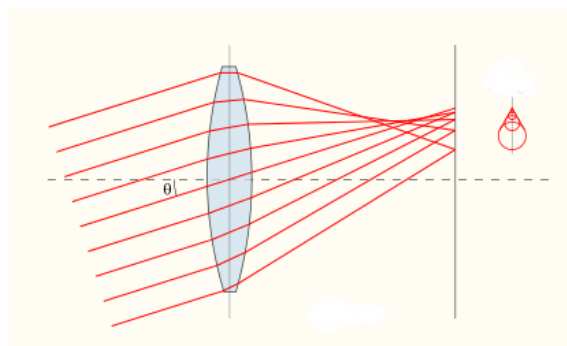


Figura 1.9: Coma

1.2.9 Astigmatismo

L'astigmatismo è un'aberrazione ottica presente in un sistema singolo o composto di lenti, dagli obbiettivi 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.

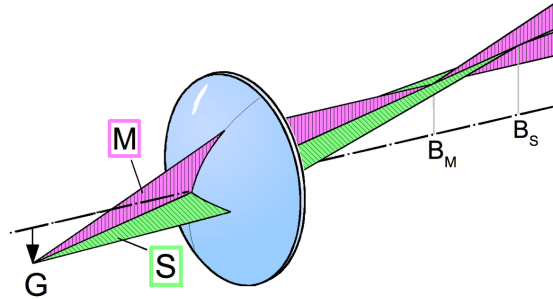


Figura 1.10: Astigmatismo

1.2.10 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.

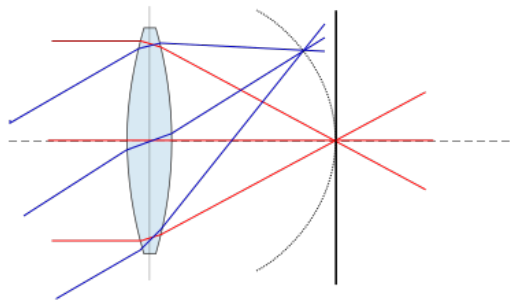


Figura 1.11: Curvatura di campo

1.2.11 Distorsione

In ottica geometrica la distorsione è la deviazione da una proiezione rettilinea, una proiezione in cui le rette nella scena rimangono rette nel piano dell'immagine. Nonostante la distorsione possa essere irregolare, la condizione che si verifica più frequente è la distorsione radiale simmetrica, solitamente esse 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.



Figura 1.12: Distorsione

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

$$x_d = x_u(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + \dots) + (P_2(r^2 + 2x_u^2) + 2P_1x_ux_u)(1 + P_3r^2 + P_4r^4 \dots)$$

$$y_d = y_u(1 + K_1r^2 + K_2r^4 + \dots) + (P_1(r^2 + 2y_u^2) + 2P_2x_ux_u)(1 + P_3r^2 + P_4r^4 \dots)$$

- (x_d, y_d) = Punti distorti proiettati sul piano immagine specified lens;
- (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;
- $r = \sqrt{(x_u - x_c)^2 + (y_u - y_c)^2}$

1.2.12 Aberrazione cromatica

Una lente singola non è soddisfacente come obbiettivo 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 1.13). 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 1.14). 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 obbiettivi vengono detti apocromatici.

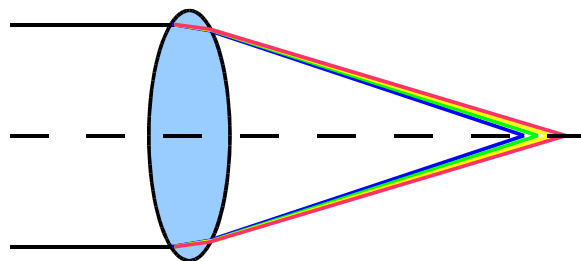


Figura 1.13: Aberrazione cromatica

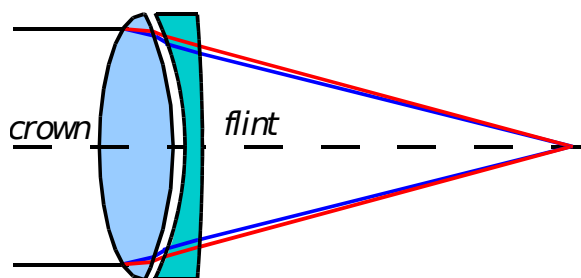


Figura 1.14: Doppietto acromatico

1.2.13 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:

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

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 obbiettivo, dipende dalla sua area, cioè da

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

dove d è il diametro dell'obbiettivo. Se puntiamo un obbiettivo 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 obbiettivo (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.

1.2.14 La risoluzione

Capitolo 2

Sistemi di imaging

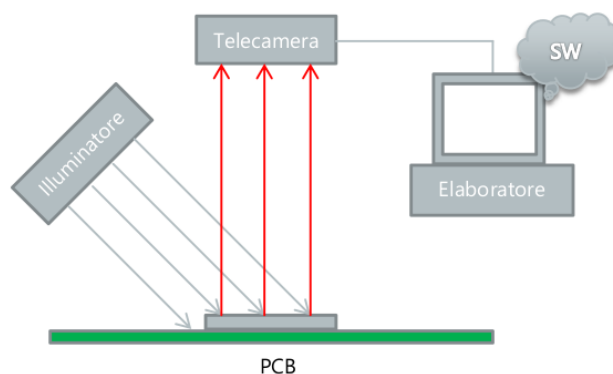


Figura 2.1: Sistema di imaging per l'ispezione automatica

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 che contiene 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 on oppure off-chip. Nelle fotocamere analogiche, la tensione da ogni sito viene letta 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, ciò è però bilanciato da 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 carica da un sito fotosensibile si riversa ai siti vicini poiché i singoli elementi hanno una capacità finita di carica, ponendo un limite superiore della 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 occupato da registri a scorrimento ad accoppiamento di carica. Questo migliora l'efficienza dei pixel, ma aumenta la sensibilità angolare di raggi di luce in entrata, richiedendo che colpiscano il sensore con incidenza normale per la raccolta efficiente.

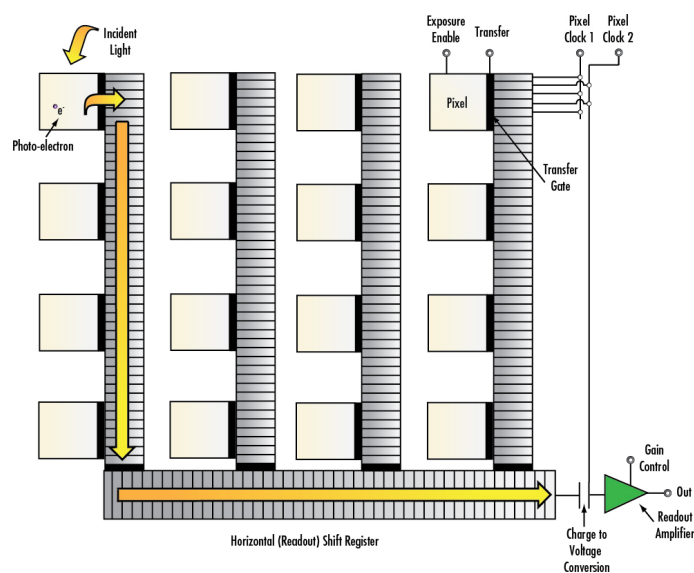


Figura 2.2: Schema a blocchi di un dispositivo CCD

2.1.2 CMOS

Il Complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) è stato inventato nel 1963 da Frank Wanlass. Tuttavia, egli non ha ricevuto un brevetto per esso fino al 1967, e non è diventato ampiamente utilizzato per applicazioni di imaging fino agli anni 1990. In un sensore CMOS, la carica dal pixel fotosensibile 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 fotodiodo 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 una bassa sensibilità e alto rumore a schema fisso a causa di incongruenze di fabbricazione nei sistemi multipli di conversione di carica e digitalizzazione.

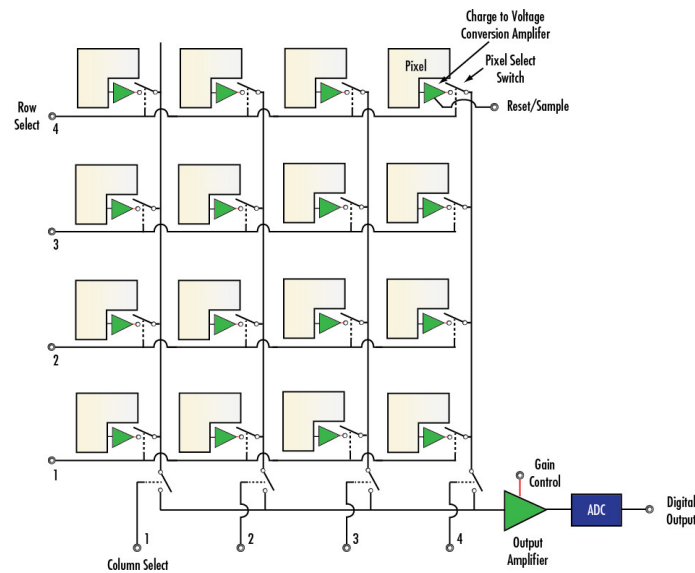


Figura 2.3: Schema a blocchi di un dispositivo CMOS

Un sensore CMOS è spesso accompagnato da un otturatore a scorrimento elettronico (rolling shutter); sebbene, con ulteriori transistori nel sito del pixel, un otturatore globale può essere realizzato in cui tutti i pixel sono esposti simultaneamente per poi procedere ad 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, riducendo così l'efficienza di raccolta del sensore rispetto ad un equivalente CCD. Questa bassa efficienza combinata con incongruenza di pixel-per-pixel contribuisce ad un più basso rapporto segnale- rumore e bassa 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 chiamati pixel. L'immagine è quindi 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 discreta del sensore, spazialmente limitato. La capacità di un pixel di convertire un fotone incidente è specificato 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 è spesso indicato semplicemente il numero di pixel, la dimensione è molto importante per l'imaging. Grandi pixel sono, in, grado di arrivare a saturazione con cariche più alte e di avere un rapporto segnale rumore migliore. Con piccoli pixel il sensore risulta più facile da realizzare anche se il blooming peggiora dovuto alla minor capacità della singola buca che abbassa il contrasto sulle alte frequenze spaziali.

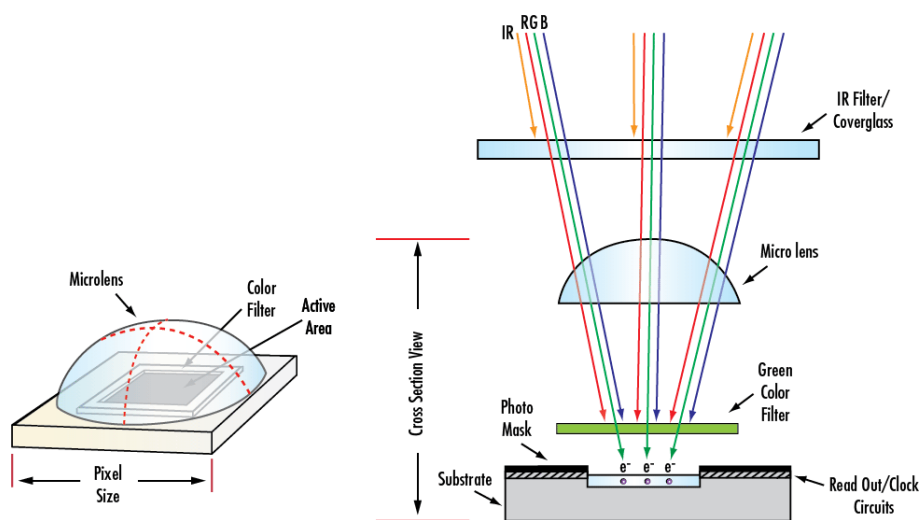


Figura 2.4: Singolo elemento fotosensibile RGB con filtro NIR

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", 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 di vignettatura (estinzione di raggi che attraversano i bordi esterni della lente di imaging). 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.

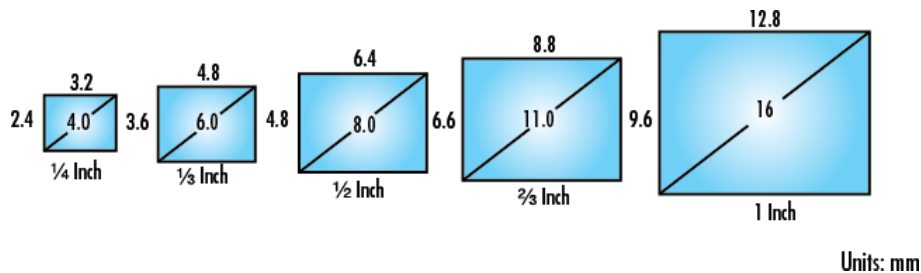


Figura 2.5: Dimensioni sensore

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 FOV.

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 controllata diminuendo 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 cablaggio, e il 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 più fotogrammi da trasferire per una velocità di trasferimento fissa. Per una buona approssimazione, il tempo di esposizione è l'inverso della frequenza di quadro. Tuttavia, c'è un tempo minimo finito tra le esposizioni (dell'ordine di centinaia di microsecondi) a causa del processo di reset pixel e lettura, anche se molte fotocamere hanno la capacità quella di leggere la matrice mentre sta già subendo l'esposizione successiva (pipeline); Questo tempo minimo viene speso sull'elettronica della fotocamera.

Le telecamere CMOS hanno frame rate superiori, come il processo di lettura di ogni pixel può essere fatto più velocemente rispetto al trasferimento di carica nel registro a scorrimento di un sensore CCD.

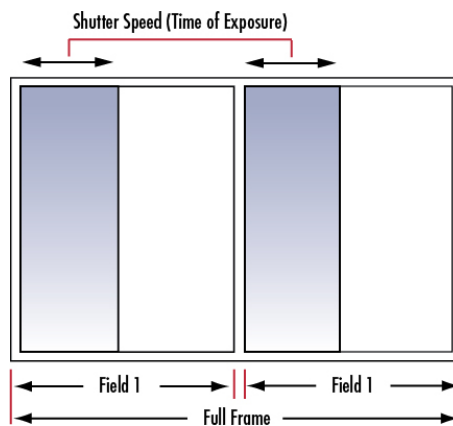


Figura 2.6: Velocità dell'otturatore

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, dal fatto che tutti i pixel sono esposti e campionati contemporaneamente, la lettura quindi si verifica in sequenza; 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 distorti 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 transistor e un condensatore supplementare per ogni pixel ma 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.

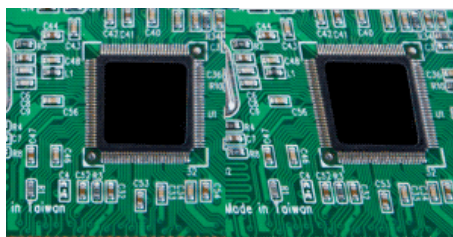


Figura 2.7: Otturatore globale e otturatore rolling su soggetto in movimento

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 simile a quanto effettuato per i field bus.

Firewire (IEEE 1394/IIDC DCAM STANDARD)

Firewire è un popolare standard seriale isocrono, è una delle interfacce con la velocità di trasmissione minore ma 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@15m per applicazioni ad alta velocità.

GigE Vision

GigE 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 multicamera. 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, ciò consente di realizzare sistemi multicamera ad alta risoluzione aggregando più sensori matriciali

USB

USB è un interfaccia disponibile su ogni modernp 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 Inspection standard USBVision simile al precedentemente descritto GigE Vision/GenICam

2.2 Illuminazione

É 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. Progettare un ambiente di analisi robusto massimizzerà la riuscita del progetto in termini di tempo, sforzo e risorse impiegate.

Storicamente, la luce è stato 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'adozioni 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 dell'utilizzo del sistema di illuminazione;
- Riproducibilità dei risultati delle ispezioni;
- Robustezza delle ispezioni a variazioni dell'ambiente di ispezione;

2.2.1 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 poichè la luce raggiunge il sensore in maniera consistente.



Figura 2.8: Illuminazione direzionale

Pro: Luminosità, flessibilità di installazione.

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

2.2.2 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 poichè la superficie incisa risulta evidenziata da questo tipo di illuminatore

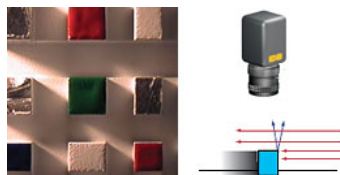


Figura 2.9: Illuminazione tangenziale

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

Contro: Punti luminosi ed eccessiva generazione di ombre

2.2.3 Illuminazione diffusa

Un illuminatore tangenziale 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, sono tuttavia di difficile impiego in contesti dove gli ingombri sono ridotti per via delle grandi dimensioni (Una sorgente di luce diffusa viene realizzata posizionando sorgenti di luce puntiformi lontano dall'area di ispezione)

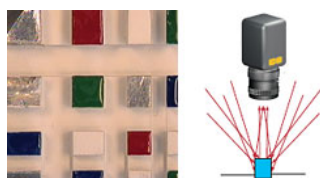


Figura 2.10: Illuminazione diffusa

Pro: Riduce al minimo i riflessi e provvede ad un illuminazione uniforme.

Contro: Grandi dimensioni, difficoltà di realizzazione

2.2.4 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)

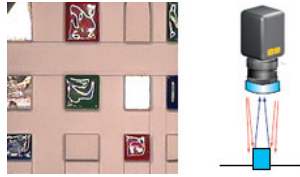


Figura 2.11: Illuminazione anulare

- 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.

2.2.5 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 2.12: Illuminazione diffusa assiale

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

2.2.6 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.

- 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.

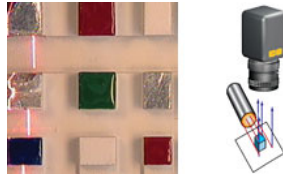


Figura 2.13: Illuminazione strutturata

2.2.7 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.

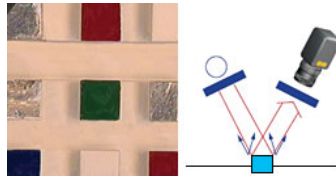


Figura 2.14: Illuminazione polarizzata

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

Contro: Diminuisce l'efficienza del sistema di illuminazione.

2.2.8 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 traslucido attraverso i bordi

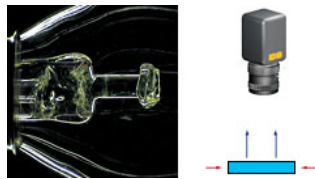


Figura 2.15: Illuminazione dark-field

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.

2.2.9 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

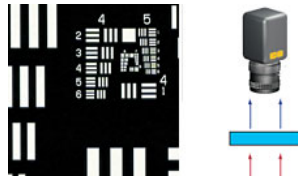


Figura 2.16: Illuminazione brightfield

Pro: Alto contrasto per il rilevamento dei bordi.

Contro: Elimina i dettagli superficiali.

2.3 Lenti

Tutte le lenti obbediscono alla legge di snell sulla rifrazione, di conseguenza la geometria della lente determina come la luce si propaga attraverso gli elementi ottici, stabiliremo ora un glossario con la terminologia e introdurremo diverse geometrie di lenti.

2.3.1 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 Exit Beam Diameter – Diametro di un anello luminoso in uscita all'elemento.
- L Lunghezza distanza effettiva fra le superfici di un elemento.

2.3.2 Piano Convex

Ideale per la collimazione o focalizzazione utilizzando luce monocromatica.

2.3.3 Double Convex

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

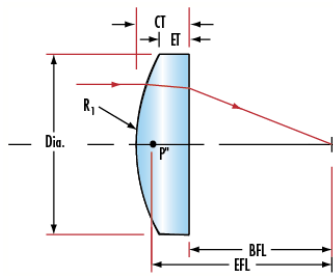


Figura 2.17: Lente Plano-Convex

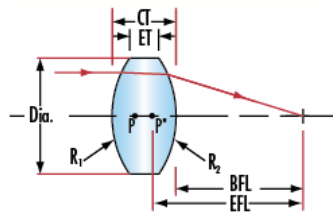


Figura 2.18: Lente Plano-Convex

2.3.4 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.

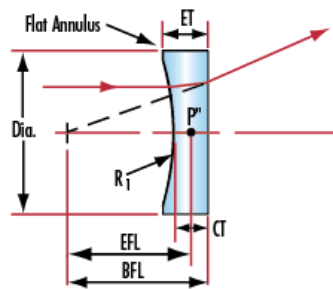


Figura 2.19: Lente Plano-Convex

2.3.5 Double Concave

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

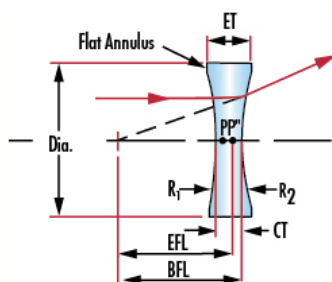


Figura 2.20: Lente Plano-Convex

2.3.6 Acromatica 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.

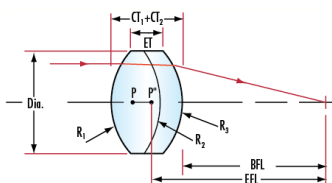


Figura 2.21: Lente Plano-Convex

2.3.7 Asferica

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

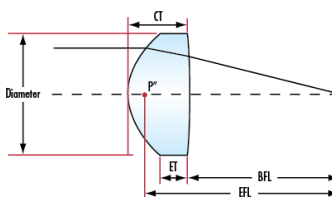


Figura 2.22: Lente Plano-Convex

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, 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 realizzare sistemi in grado di "capire" ed estrarre le informazioni.

Sottodomini di computer vision includono la ricostruzione delle scene, il rilevamento degli eventi, il monitoraggio video, 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 multidimensionale 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 nella coordinata (x, y) coppia reale. Un'immagine a sua volta può essere considerata contenere 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 essere numeri reali o numeri interi. Quest'ultimo è di solito un risultato di un processo di quantizzazione che converte un intervallo continuo (per esempio, tra 0 e 100% in per un numero discreto di livelli. In alcuni processi di formazione dell'immagine, tuttavia, il segnale può derivare dal conteggio di fotoni 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 un vero 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. Un altro esempio è CMYK, usato per la stampa, basato su quattro colori fondamentali: 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 o solo 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, che contiene diverse informazioni sull'immagine, a partire dal numero di righe e colonne di pixel: 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. La tecnica utilizzata per queste immagini, rappresentate da una matrice $N \times M$, dove N è il numero delle righe di pixel dell'immagine e M delle colonne, è detta raster. 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 da radar e microscopi elettronici; inoltre possono venire sintetizzate anche a partire da dati arbitrari, come funzioni matematiche bidimensionali o modelli geometrici tridimensionali.

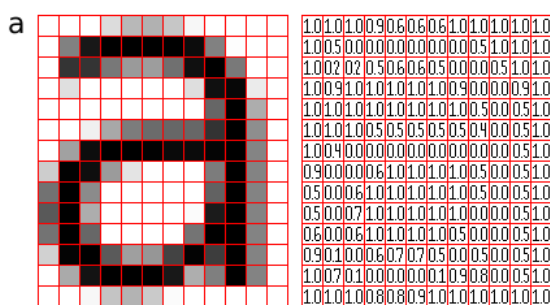


Figura 3.1: Rappresentazione numerica di un immagine

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

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

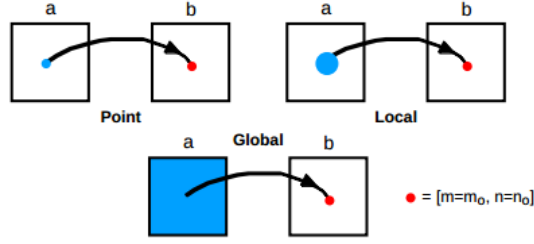


Figura 3.2: Operazione puntuale, locale, globale.

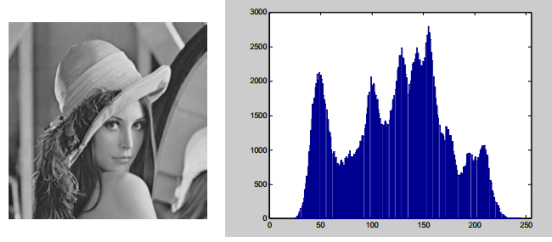


Figura 3.3: Istogramma dei livelli di grigio.

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 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 in figura 3.8

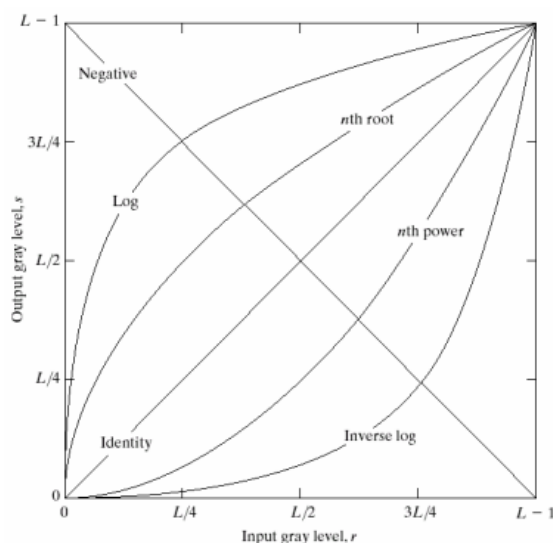


Figura 3.4: Trasformazioni su istogramma.



Figura 3.5: Inversione dei livelli di grigio.

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 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 le scene di interesse conducono ad immagini che possono essere considerate binarie, cioè contenenti nel caso ideale solo due livelli di grigio (bianco, nero) ad esempio : 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. Dopo l'acquisizione di una scena da parte di un

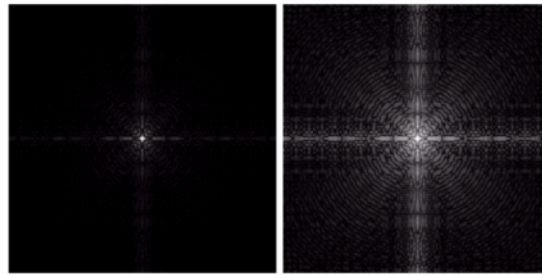


Figura 3.6: Compressione logaritmica.

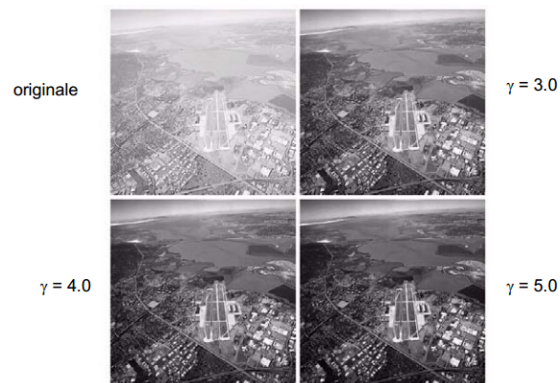


Figura 3.7: Compressione potenza.

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

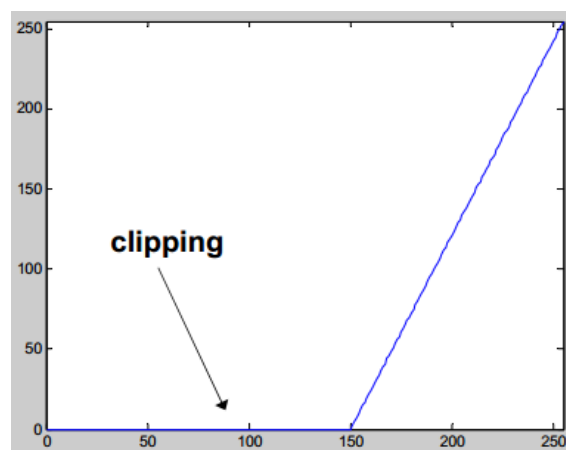


Figura 3.8: Esempio di espansione del contrasto.

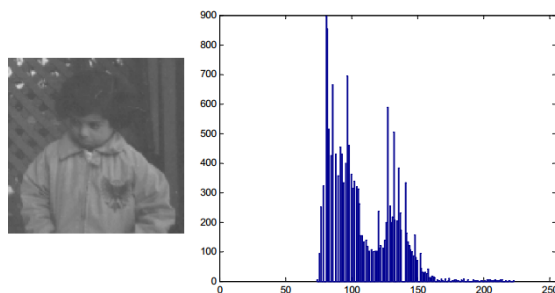


Figura 3.9: Prima dell'equalizzazione.

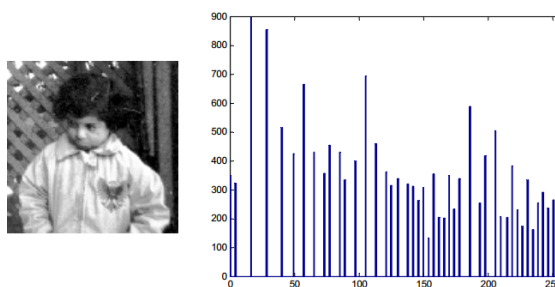


Figura 3.10: Dopo l'equalizzazione.

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. 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, la determinazione della soglia richiede quindi 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 e dovuto all'illuminazione della scena o alla disomogeneità del fondo, e' 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 miglioramento della qualità di un'immagine (come per gli operatori puntuali) e per l'estrazione di caratteristiche dell'immagine (immagine in ingresso \rightarrow 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 sottoimmagine delle stesse dimensioni del vicinato del punto, in modo da corrispondere ai punti che vanno a pesare. La sottoimmagine 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 (3×3 , 5×5 , 7×7 , ...) 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 $n \times m$ da utilizzare come maschera di convoluzione, poichè i valori dei pixel di uscita

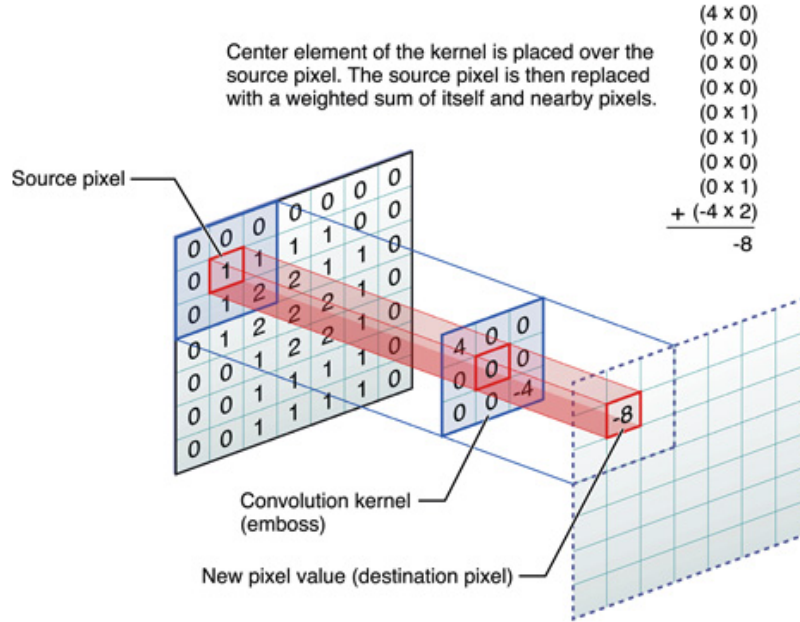


Figura 3.11: Applicazione di un operatore locale.

devono rimanere nello stesso range di ingresso i coefficienti della maschera $w(i)$ devono essere normalizzati per rispettare la condizione:

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

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 freq. spaziale)

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

1/9	1	1	1
	1	1	1
	1	1	1

1/25	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1
	1	1	1	1	1

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

isotropo più semplice è il laplaciano:

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

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

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

3.1.11 Canny edge detector

Nell'elaborazione di immagini, l'algoritmo di Canny 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.

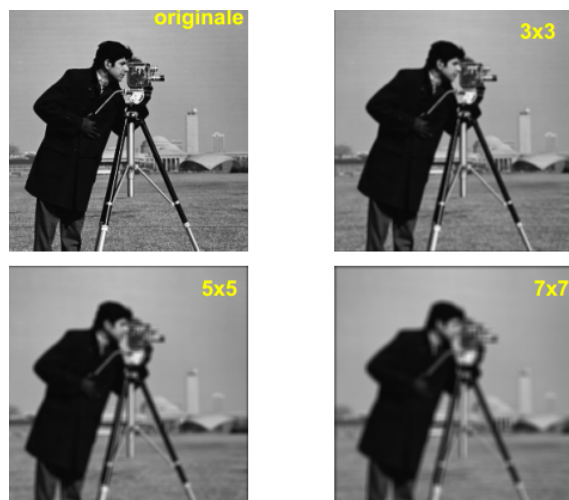


Figura 3.14: Filtri di smoothing - Blurring con dimensioni maschera differenti

$$\begin{array}{cc}
 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \\
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & +1 & 0 \\ \hline 0 & -2 & 0 \\ \hline 0 & +1 & 0 \\ \hline \end{array} & \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline +1 & -2 & +1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{array}{c}
 \nabla^2 f \\
 \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & +1 & 0 \\ \hline +1 & -4 & +1 \\ \hline 0 & +1 & 0 \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

Figura 3.15: Laplaciano

Per il riconoscimento dei contorni l'algoritmo di Canny usa un filtro basato sulla derivata prima di una gaussiana, e quindi i risultati prodotti sono disturbati dal rumore presente nei dati di un'immagine "grezza" (raw image). 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, quindi 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

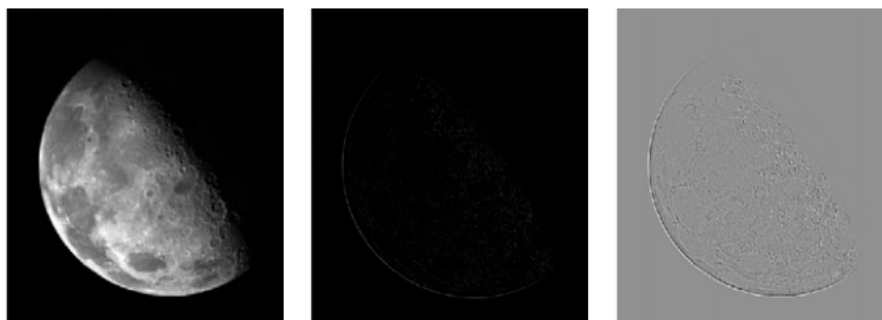


Figura 3.16: Laplaciano applicato ad un immagine

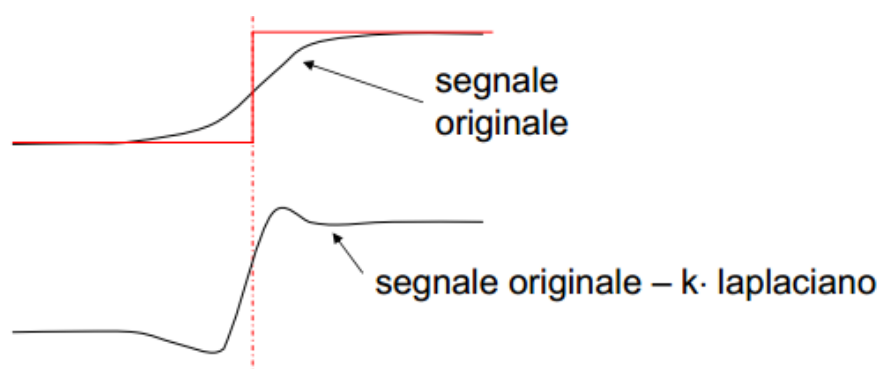


Figura 3.17: Correzione del segnale originale con laplaciano

no ad un contorno. Solo i punti corrispondenti a dei massimi locali sono considerati come appartenenti ad un contorno, e saranno presi in considerazione dai successivi step di elaborazione. Un massimo locale si ha nei punti in cui la derivata del gradiente si annulla.

L'estrazione dei contorni dalla mappa generata dallo step precedente si esegue con un procedimento chiamato sogliatura 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

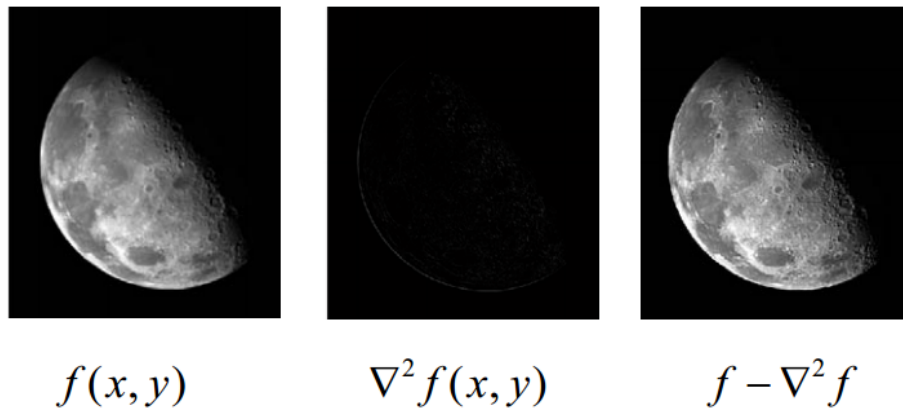


Figura 3.18: Laplacian sharpening

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 sfuocatura, e permettono di riconoscere contorni più netti. Filtri più grandi producono una maggiore sfuocatura, 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 un 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

Object recognition (in italiano: riconoscimento di oggetti) nella computer vision 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 computer vision 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.

Per ogni oggetto in un'immagine, ci sono molte "features", che sono caratteristiche interessanti dell'oggetto, le quali possono essere estratte in modo da fornire una descrizione "caratteristica" dell'oggetto. Questa descrizione estratta da una immagine campione può poi essere utilizzata per identificare l'oggetto durante il tentativo di individuare l'oggetto 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, i disturbi, l'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 presenti 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.

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

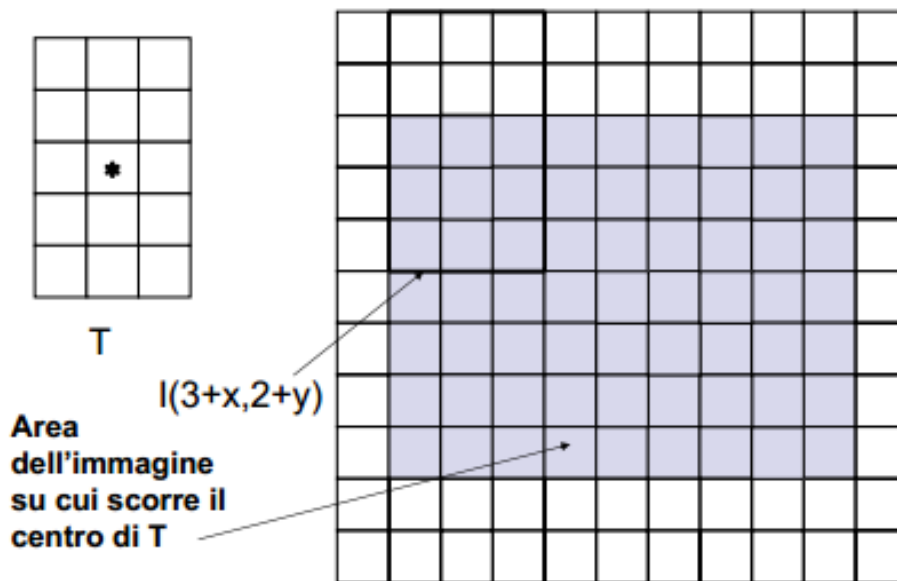


Figura 3.19: Template matching

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, cioè un insieme di misure o di proprietà qualitative che permettano di caratterizzare completamente l'oggetto ai fini del riconoscimento, siano insensibili a variazioni non significative presenti sulle istanze dell'oggetto e consentano di discriminare tra istanze di oggetti diversi

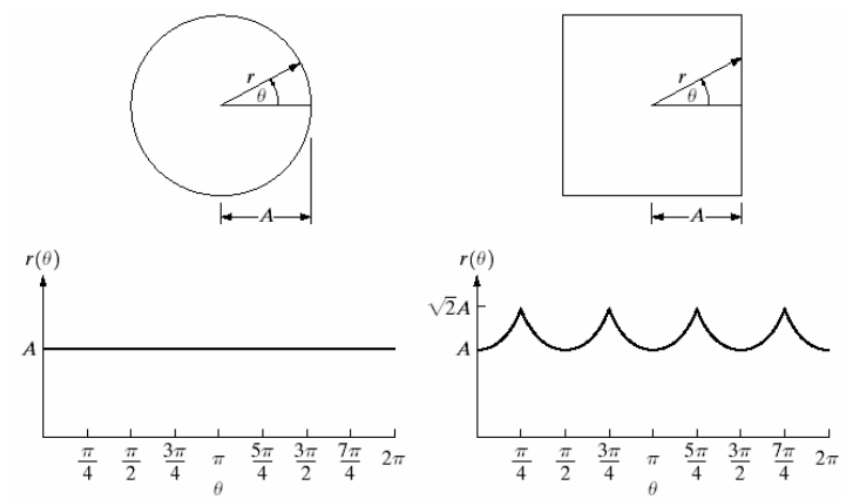


Figura 3.20: Signatures

Capitolo 4

Automatic Optical Inspection

4.1 Ispezione dei dispositivi elettronici

Nuovi sviluppi nell'assemblaggio di PCB non possono avvenire se non con cambiamenti corrispondenti nella tecnologia di controllo della qualità. Il test in-circuit è stato per anni il mezzo principale per la rilevazione e la diagnosi dei difetti poichè 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.

4.1.1 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 scansisce 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 ma 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'immagini, 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 features visuali necessari all'ispezione.

4.2 Tipologie di ispezione ottica automatica delle schede elettroniche

4.2.1 Presenza di un componente

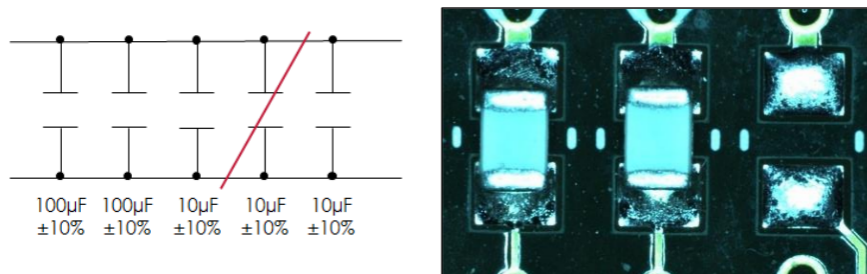


Figura 4.1: Test di presenza

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 una capacità di filtro in parallelo ad altre;

4.2.2 Posizionamento di un componente

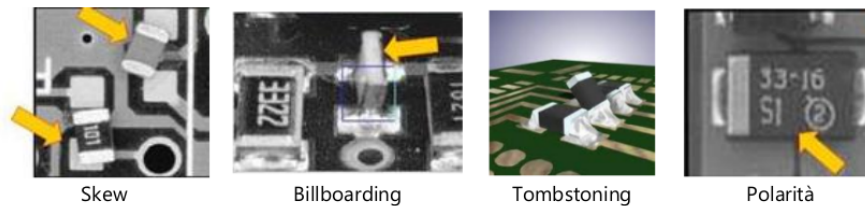


Figura 4.2: Test di posizionamento

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 presente

- Verifica ottica dei caratteri
- Optical Character Recognition
- Lettura di codici a barre

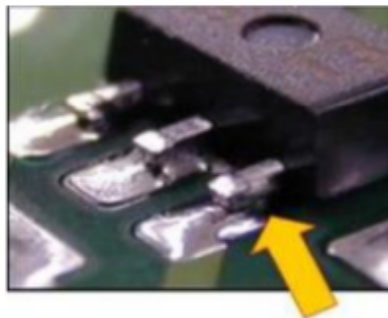


Figura 4.3: Test della saldatura

4.2.4 Test della saldatura

Obiettivo di questo test è garantire che il processo di saldatura sia conforme alle specifiche di produzione, alcuni 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 fiduciali (Fiducials) sulla superficie del PCB all'interno di macchine non AOI ma che abbiano bisogno di elevata contattazione.

Il riconoscimento dei punti fiduciali rappresenta per il sistema in oggetto un metodo per correlare la posizione della scheda all'interno dell'area di lavoro con le quote definite nel CAD.

4.3 Macchine SPEA

In questa sezione vorrei parlare delle macchine SPEA e di come adottino funzionalità di computer vision per realizzare funzioni di ispezione automatica oppure di calibrazione del sistema.

4.3.1 Flying probes



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 fixtures a letto d'aghi, utilizza un numero di sonde sia fisse che mobili per la contattazione. A seconda del modello un tester di questa tipologia può essere equipaggiato con un numero variabile tra 1 e 20 probes (di solito 4) in grado di contattare la scheda sotto test sia dal lato superiore che da quello inferiore in modo da scansare 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 nell'ordine di 40 contattazioni al secondo 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 testing 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 mentre la scheda sottoposta a test risulta 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 per includere altre metodologie di test quali boundary scan, AOI, test funzionale e ispezione termica per aumentare il più possibile la copertura del testing e quindi 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

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 fault.

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.

4.3.2 Pick and Place handlers



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 fault 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 e 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 e 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). 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) in grado di accettare parti non organizzate in maniera specifica e di procedere al sorting su vassoio automatico.

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 se il 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 elettromeccaniche 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 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.

Capitolo 5

Spea.Vision Library

Questo capitolo dovrebbe discutere del lavoro effettivamente svolto in spea con la creazione di una libreria di visione ed il suo progetto.

5.1 Requisiti

Analisi dei requisiti.

5.2 Scelte progettuali

- Linguaggio di programmazione.
- Tecnologie utilizzate.
- Controllo versione.
- Strategie di deployment

5.3 Architettura

- UML
- Design patterns

5.4 Spea Optical Test App

Questa sezione dovrebbe discutere dell'ambiente di programmazione grafica associato alla libreria di visione, qui si discuterà del modello di esecuzione, della risoluzione delle dipendenze tra blocchi di image processing, di opportunità di parallelizzazione ecc.

Capitolo 6

Caso di studio, VUH160 Ispezione dei contatti su package BGA

In questo capitolo vorrei parlare di una applicazione ottica realizzata per l'ispezione delle ball presenti su un package BGA con destinazione automotive.

Capitolo 7

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 deve dipendere da una costruzione artificiale di una sorta di palcoscenico su cui la parte da ispezionare viene presentata, non è in grado di comprendere intimamente la parte ispezionata. 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.