

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni
Dipartimento di Elettronica e Informazione



**METODO DI CORREZIONE PER
IL RICONOSCIMENTO
DELL'IRIDE DA VISTE NON
ORTOGONALI**

Relatore: Prof. Marco Marcon

**Tesi di Laurea Specialistica di:
Nicolò Tommaso Moltrasio, matricola 739757**

Anno Accademico 2010-2011

Ringraziamenti

Eccolo, lo vedo... ho raggiunto il traguardo!

In questo giorno di festa, nel quale si chiude la mia carriera da studente universitario, sento il bisogno di ringraziare le persone che mi hanno da sempre sostenuto e quelle che hanno reso possibile la realizzazione di questo progetto di tesi.

Desidero ringraziare in primo luogo il Professor Marcon per avermi dato la possibilità di lavorare su questo progetto, per avermi seguito con interesse e per aver partecipato attivamente durante lo svolgimento del lavoro.

Per esser stati sempre presenti, per avermi aiutato anche nei momenti più difficili, per aver gioito con me dei successi conseguiti durante il percorso, ringrazio mamma Cinzia e papà Massimo: genitori straordinari.

Come loro, anche Katia, Rissieri, Maria e Norma, mi hanno sempre sostenuto e meritano perciò un grande ringraziamento.

Devo ringraziare infine tutti i miei amici e tutti i miei compagni di studi con i quali ho avuto modo di condividere direttamente non solo il percorso di studi, ma anche momenti di assoluto divertimento.

Se sono arrivato fino a qui non è sicuramente solo per merito mio, ma è anche per merito vostro; tutte le persone che mi sono state vicine durante il cammino universitario si sentano citate in questi ringraziamenti, fatti con la coscienza di chi si è accorto che da solo non ce l'avrebbe mai fatta.

Indice

1	Cenni sui sistemi biometrici	13
1.1	Le caratteristiche biometriche	14
1.2	Affidabilità dei sistemi biometrici	15
2	Sistema di riconoscimento dell'iride	18
2.1	Acquisizione	20
2.2	Segmentazione	23
2.2.1	Trasformata di Hough	23
2.2.2	Metodo di Daugman	26
2.2.3	Altri algoritmi di segmentazione	28
2.3	Normalizzazione	29
2.3.1	Daugman's Rubber Sheet Model	31
2.4	Estrazione e codifica delle feature	37
2.5	Matching	41
2.6	Riconoscimento dell'individuo	44
3	La biometria dell'occhio umano	47
3.1	Anatomia e fisiologia	47
3.1.1	L'iride	50
3.1.2	La cornea	52
3.2	Modellizzazione	54
4	Algoritmo di correzione	62
4.1	Database WVU	64
4.2	Segmentazione	64
4.3	Tracing	68

4.3.1	Il metodo dell'iconale	68
4.3.2	Implementazione del metodo dell'iconale	72
4.4	Correzione immagine con iride centrale	77
4.5	Correzione immagine con iride non centrale	83
5	Risultati	91
5.1	L'effetto distorcente della cornea	91
5.2	Riconoscimento dell'individuo	97
5.2.1	Test di autenticazione	99
6	Conclusioni e sviluppi futuri	102
	Bibliografia	104

Elenco delle figure

2.1	Confronto tra modalità di acquisizione	21
2.2	Geometrie d'acquisizione	22
2.3	Filtro mediano	25
2.4	Mappa dei contorni dell'immagine	26
2.5	La matrice di accumulazione.	27
2.6	Immagine segmentata.	27
2.7	Visione d'insieme dei più rilevanti metodi di segmentazione pubblicati di recente.	30
2.8	Schema di normalizzazione di Daugman.	31
2.9	Esempio di normalizzazione: immagine sintetica.	32
2.10	Esempio di normalizzazione: immagine reale	34
2.11	Schema di normalizzazione.	35
2.12	Errori in fase di normalizzazione.	36
2.13	Modellizzazione deformazioni elastiche dell'iride	37
2.14	Wavelet Log-Gabor.	39
2.15	Quantizzazione di fase.	40
2.16	Iris Code.	40
3.1	La struttura dell'occhio umano.	48
3.2	La struttura dell'iride.	52
3.3	Composizione della cornea.	53
3.4	Modelli semplificati delle discontinuità dell'occhio umano . . .	56
3.5	Modello semplificato di Liou - Brennan	57
3.6	Geometria del modello considerato	57
3.7	Geometria del modello 3D costruito.	59

3.8	Sezione a metà altezza della mappa degli indici di rifrazione del modello	60
4.1	Immagini tratte dal database WVU.	65
4.2	Effetto distorcente ottenuto nel caso di acquisizione off-angle.	66
4.3	Estrazione della regione d'interesse circolare attraverso l'operazione di segmentazione.	67
4.4	Estrazione della regione d'interesse ellittica attraverso l'operazione di segmentazione.	69
4.5	Reticolo di punti in corrispondenza dell'iride	73
4.6	Ray tracing	76
4.7	Reticolo di campionamento frontale	78
4.8	Reticolo di punti distorto dalle discontinuità	79
4.9	Effetto introdotto dalle discontinuità.	80
4.10	Confronto tra immagine originale e immagine corretta	82
4.11	Distorsione di forma dell'iride nell'immagine	83
4.12	Segmentazione immagine acquisita.	84
4.13	Trasformazione affine della regione estratta dall'immagine acquisita.	85
4.14	Reticolo di campionamento non frontale	87
4.15	Effetto introdotto dalle discontinuità.	88
4.16	Reticolo di punti distorto dalle discontinuità	89
4.17	Confronto tra immagine originale e immagine corretta	90
5.1	Distorsioni nell'acquisizione ortogonale.	92
5.2	Distorsioni nell'acquisizione non ortogonale.	93
5.3	Modello Lightwave.	95
5.4	Deformazione della griglia per acquisizione ortogonale.	96
5.5	Deformazione della griglia per acquisizione non ortogonale ($\phi_v = 30^\circ$).	98

Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche dei sistemi biometrici	16
5.1	Risultati fase di verifica	100
5.2	Test fase di identificazione con immagini acquisite a $\phi_v = 30^\circ$, a valle della correzione geometrica.	101
5.3	Test per la fase di identificazione con immagini acquisite a $\phi_v = 30^\circ$, a valle della compensazione delle distorsioni intro- dotte dai salti d'indice di rifrazione.	101

Sommario

La maggior parte dei sistemi per il riconoscimento dell'iride è dedicata all'elaborazione e al riconoscimento di immagini acquisite da viste frontali, attraverso la collaborazione dell'utente. Le immagini così acquisite permettono, ad oggi, di operare il riconoscimento con adeguato grado di affidabilità. In assenza della collaborazione dell'utente, l'acquisizione ortogonale non può essere realizzata e l'immagine ottenuta presenta delle distorsioni principalmente causate dal disallineamento tra dispositivo di acquisizione e iride.

Le distorsioni, oltre a generare una variazione di forma dell'iride nell'immagine acquisita, sono non lineari poiché dipendono dalla morfologia e dalle proprietà fisiche degli strati superficiali che proteggono l'iride dall'ambiente esterno, e rifrangono la luce entrante focalizzandola sulla retina.

Tali distorsioni fanno sì che le prestazioni offerte dal sistema di riconoscimento diminuiscano drasticamente e, spesso, siano tali da rendere impossibile la corretta identificazione del soggetto.

L'impossibilità di poter operare il riconoscimento con adeguato livello di affidabilità in assenza della collaborazione dell'individuo da identificare, limita i campi d'impiego e le possibili applicazioni, in particolar modo per i settori in cui la richiesta di collaborazione non è sempre auspicabile.

Volendo estendere le potenzialità e l'applicabilità dei moderni sistemi di riconoscimento dell'iride, è necessario perciò rendere possibile il riconoscimento anche in assenza di collaborazione dell'utente coinvolto.

Questo lavoro di tesi è dedicato allo studio e allo sviluppo di un metodo per la correzione delle distorsioni introdotte nell'immagine, a causa dell'acquisizione da viste non ortogonali. In questo documento si descrive dettagliatamente il metodo di correzione sviluppato e si illustrano la metrica e le modalità di test utilizzate per validare l'algoritmo.

Introduzione

La crescente richiesta di sicurezza, derivante anche dai recenti accadimenti a livello mondiale, ha portato in primo piano la necessità di utilizzare tecniche di identificazione dell'individuo che superino i limiti delle metodologie di riconoscimento impiegate fino ad oggi.

La società moderna tende ad attribuire sempre maggior importanza ai sistemi che forniscono questo tipo di servizio contribuendo così ad aumentare sicurezza ed affidabilità nella protezione delle informazioni e delle persone. Per questo, l'uso di sistemi biometrici è stato incoraggiato da più enti; pubblici e privati, al fine di sostituire o migliorare i sistemi di sicurezza tradizionali. In sostanza, l'obiettivo è stabilire l'identità di una persona in base a ciò che è, piuttosto che ciò che possiede o ricorda (ad esempio, una carta d'identità o di una password).

Un sistema di riconoscimento biometrico permette di identificare una persona attraverso la misurazione di caratteristiche biologiche o comportamentali e il confronto con altre precedentemente convalidate e memorizzare all'interno di un database.

Caratteristiche biometriche comportamentali possono essere voce, grafia oppure stile di battitura mentre tra le caratteristiche biometriche fisiologiche le più comuni sono iride, impronte digitali, mano e volto.

In questo contesto, l'iride, nonostante sia di dimensioni ridotte, è accettata con largo consenso come una delle caratteristiche biometriche più utili, date le sue caratteristiche di unicità. Per questo i sistemi di riconoscimento basati sull'iride sono stati utilizzati con successo in più settori distinti, come il check-in [5], o il controllo di rifugiati.

Tuttavia, per motivi di precisione, i sistemi attualmente in uso, richiedo-

no che i soggetti siano abbastanza vicini al dispositivo di acquisizione, dove devono rimanere per un periodo di circa tre secondi, fino a quando i dati vengono acquisiti nel modo corretto.

Le situazioni nelle quali il sistema di riconoscimento deve operare cambiano in relazione alle modalità attraverso le quali può essere resa disponibile l'immagine del soggetto da riconoscere. Se l'individuo collabora durante il processo di acquisizione, l'immagine, dato d'ingresso al sistema di riconoscimento, verrà acquisita con la massima precisione in modo che presenti risoluzione sufficientemente elevata.

Al contrario, in assenza di cooperazione da parte del soggetto coinvolto nel processo di riconoscimento, l'immagine acquisita può presentare scarsa risoluzione e, in alcuni casi, può contenere distorsioni legate al non perfetto allineamento tra iride e camera (acquisizione non ortogonale).

La richiesta di cooperazione risulta quindi necessaria al fine di acquisire immagini con qualità sufficiente per il riconoscimento.

Le non idealità, introdotte per effetto dell'acquisizione non ortogonale, fanno sì che le prestazioni offerte dal sistema di riconoscimento diminuiscano drasticamente e, spesso, siano tali da rendere impossibile la corretta identificazione del soggetto.

L'impossibilità di poter operare il riconoscimento con adeguato livello di affidabilità in assenza della collaborazione dell'individuo da identificare, limita i campi d'impiego e le possibili applicazioni, in particolar modo per i settori in cui la richiesta di collaborazione non è sempre garantita.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è implementare un metodo di correzione in grado di determinare e correggere le distorsioni introdotte nella fase di acquisizione che, in assenza della collaborazione dell'utente viene effettuata da viste non frontali.

Si vuole quindi introdurre una tecnica di elaborazione dell'immagine acquisita che compensi principalmente le distorsioni introdotte con l'acquisizione non ortogonale, in modo che, integrando tale tecnica nei sistemi già esistenti, divenga possibile effettuare il riconoscimento dell'individuo in assenza di cooperazione.

Il primo capitolo di tesi fornisce una panoramica riguardo le possibilità offerte dalle varie tipologie di sistemi biometrici, in relazione alle proprietà delle caratteristiche biometriche che tali sistemi utilizzano.

Il secondo capitolo di tesi è dedicato allo studio delle tecniche di elaborazione dell'immagine nell'ambito dei sistemi per il riconoscimento dell'iride.

Nel capitolo successivo si dà una descrizione dell'anatomia e della fisiologia dell'occhio umano, si procede col presentare dei modelli sintetici atti a fornire una rappresentazione schematica della complicata struttura che lo caratterizza e si descrive dettagliatamente la modellizzazione in ambiente MATLAB[®], da noi considerata.

Il quarto capitolo contiene al suo interno la teoria e la metodologia attraverso le quali abbiamo sviluppato l'algoritmo di correzione e, dopo una breve descrizione del database da cui sono state tratte le immagini, illustra dettagliatamente l'algoritmo di correzione dell'immagine da noi creato.

Nel quinto capitolo si presentano i risultati ottenuti mentre nell'ultimo capitolo si traggono le conclusioni sul lavoro svolto e si suggeriscono alcuni possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

Cenni sui sistemi biometrici

L'identificazione di un individuo per l'accesso ad aree riservate è la componente principale di un sistema definito sicuro.

Nel tempo sono state utilizzate varie tecniche concettualmente diverse a seconda del tipo di richiesta fatto durante il processo di identificazione: richiesta di "ciò che l'utente conosce" o richiesta di "ciò che l'utente possiede".

Il più conosciuto strumento di identificazione è la cosiddetta password, sequenza di caratteri alfanumerici utilizzata per accedere in modo esclusivo a una risorsa informatica, ad esempio alla casella e-mail. Questo meccanismo più che accertare l'identità, si limita a verificare un'entità che in quel momento l'individuo possiede. Infatti in questo caso l'identificazione avviene attraverso la digitazione di un codice e dunque il sistema verifica ciò che l'utente conosce. I badge o le smart card fanno parte invece dei metodi che si affidano al possesso, quindi hanno il ruolo di un documento valido di riconoscimento. Anche in questo caso il problema della sicurezza si evidenzia nel fatto che il sistema non è in grado di stabilire se colui che detiene il documento ne sia anche l'effettivo proprietario.

L'impiego di tecniche biometriche per l'identificazione risulta essere il metodo alternativo in grado di risolvere i problemi sopra citati assicurando la presenza dell'individuo. Quest'ultima proprietà è dovuta al fatto che le caratteristiche biometriche non possono essere né dimenticate, né prestate e inoltre risultano difficili da contraffare.

1.1 Le caratteristiche biometriche

Un sistema di riconoscimento biometrico permette di identificare una persona attraverso la misurazione di caratteristiche biologiche o comportamentali e il confronto con altre precedentemente convalidate e memorizzare all'interno di un database.

I requisiti che una caratteristica biologica deve possedere per essere utilizzata come grandezza biometrica sono [12]:

1. **Universalità:** la caratteristica biometrica da valutare deve essere posseduta da tutti i membri della popolazione;
2. **Unicità:** ogni firma biometrica deve differire da quella di ogni altro membro della popolazione;
3. **Invarianza:** la firma digitale non deve variare nelle diverse condizioni di rilevamento e nel tempo;
4. **Misurabilità:** le caratteristiche devono essere misurabili quantitativamente e ottenibili facilmente;
5. **Performance:** si riferisce all'accuratezza di riconoscimento raggiungibile e alle risorse necessarie per il conseguimento;
6. **Accettazione:** indica il grado di accettazione del sistema di rilevazione biometrica da parte dei membri della popolazione;
7. **Robustezza:** indica quanto il sistema biometrico si presta a tentativi di accesso fraudolento.

Tra le caratteristiche biologiche impiegabili in un sistema biometrico si possono distinguere grandezze fisiologiche e grandezze comportamentali.

Le caratteristiche fisiologiche, o stabili, si riferiscono a dati statici come le impronte digitali, la geometria della mano, la geometria del volto, la retina o l'iride.

Le caratteristiche comportamentali, o dinamiche, invece si riferiscono ad un'azione svolta dall'individuo, come la sua calligrafia, la traccia vocale o

lo stile di battitura.

In generale le caratteristiche fisiologiche sono soggette a piccole variazioni nel tempo, mentre quelle comportamentali sono influenzabili dalla situazione psicologica dell'individuo. Per tale motivo i sistemi biometrici basati su grandezze comportamentali hanno bisogno di continui aggiornamenti.

1.2 Affidabilità dei sistemi biometrici

Le tecnologie che si avvalgono delle caratteristiche biometriche risultano essere una valida ed efficace alternativa per lo sviluppo di applicazioni orientate al controllo degli accessi ad aree sicure.

Tra le diverse tipologie di sistemi biometrici, se si analizzano i sistemi basati su caratteristiche fisiologiche, si nota come risultino essere buoni sia in termini di prestazione che di robustezza, in quanto le grandezze utilizzate sono difficilmente riproducibili.

Perché possano offrire un buon livello di prestazioni, i sistemi di riconoscimento basati su caratteristiche comportamentali hanno bisogno di continui aggiornamenti riguardo le caratteristiche su cui operano poiché queste possono variare nel tempo.

In ogni caso è necessario sottolineare che non esiste un sistema nettamente migliore di un altro; la scelta dunque risulta essere un compromesso tra la qualità delle proprietà associate alla caratteristica scelta e i costi di produzione. In tabella 1.1 vengono riportate le principali tipologie di sistemi di riconoscimento biometrico.

Sfortunatamente i metodi basati sulla biometria, dal punto di vista dell'utente, risultano essere abbastanza invasivi (basso livello di gradimento): nella maggior parte dei casi si richiede all'individuo che si deve autenticare, di avere un contatto fisico con un sensore o di eseguire azioni speciali come ad esempio ripetere una specifica sequenza di movimenti.

Una delle tecniche meno invasive, e quindi con alto livello di gradimento, è quella basata sul riconoscimento del volto, ma risulta essere anche la meno performante in quanto volti di persone diverse possono avere caratteristiche comuni (basti pensare a gemelli omozigoti).

L'iride, essendo un corpo visibile come il volto, permette un'acquisizione a

Sistema biometrico	<i>Universalità</i>	<i>Unicità</i>	<i>Invarianza</i>	<i>Misurabilità</i>	<i>Performance</i>	<i>Accettazione</i>
<i>Geometria volto</i>	Alto	Basso	Medio	Alto	Basso	Alto
<i>Impronte digitali</i>	Medio	Alto	Alto	Medio	Alto	Medio
<i>Geometria mano</i>	Medio	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio
<i>Venature mano</i>	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
<i>Termogramma facciale</i>	Alto	Alto	Basso	Alto	Medio	Alto
<i>DNA</i>	Alto	Alto	Alto	Basso	Basso	Medio
<i>Orecchio</i>	Medio	Medio	Alto	Basso	Basso	Medio
<i>Retina</i>	Alto	Alto	Medio	Basso	Alto	Basso
Iride	Alto	Alto	Alto	Medio	Alto	Medio
<i>Stile battitura</i>	Basso	Basso	Basso	Medio	Basso	Medio
<i>Voce</i>	Medio	Basso	Basso	Medio	Basso	Alto
<i>Calligrafia</i>	Basso	Basso	Basso	Medio	Basso	Alto
<i>Odore</i>	Alto	Alto	Alto	Basso	Basso	Medio
<i>Andatura</i>	Medio	Basso	Basso	Alto	Basso	Alto

Tabella 1.1: Caratteristiche dei diversi sistemi biometrici.

distanza, a differenza della retina che necessita una scansione ravvicinata da una distanza inferiore ai 10 cm; inoltre, poiché la sua rappresentazione è bi-dimensionale, permette una più facile estrazione delle caratteristiche.

Altre caratteristiche che fanno dell'iride un'ottima grandezza biometrica sono l'unicità e l'invarianza.

La pigmentazione e la disposizione delle fibre radiali dell'iride sono caratteristiche uniche per ogni individuo (l'iride ha 266 caratteristiche uniche, mentre l'impronta digitale ne ha solo 90) ed è provato inoltre che iridi di due gemelli omozigoti sono del tutto diverse l'una dall'altra (a differenza del DNA che risulta molto simile). Anche nello stesso individuo l'iride dell'occhio destro è differente dall'iride dell'occhio sinistro.

Per quantificare la proprietà di Unicità è stato stimato che la probabilità di trovare sulla terra due iridi uguali è pari a circa 10^{-78} .

Inoltre l'iride è strutturalmente invariante già a un anno dalla nascita e rimane tale fino alla scomparsa dell'individuo; è un organo protetto dalla cornea e non è soggetto a malattie che possano modificarne l'aspetto.

Alla luce di tutte queste considerazioni la scelta dell'iride come caratteristica biologica utile per costruire un sistema biometrico efficiente risulta sensata e con buone prospettive.

Capitolo 2

Sistema di riconoscimento dell'iride

Allo stato attuale il riconoscimento dell'individuo tramite l'iride è da ritenersi una delle tecniche più precise e affidabili tra quelle disponibili.

I vantaggi associati all'impiego di un sistema di riconoscimento dell'iride sono molteplici.

L'iride, essendo un organo interno, è ben protetto da danni e usura da una membrana sensibile e trasparente detta cornea. Ciò lo distingue dalle impronte digitali, il cui riconoscimento può risultare difficoltoso in seguito a diversi anni di lavoro manuale. La sua configurazione geometrica è controllata da due muscoli, costrittore e dilatatore della pupilla, che controllano il diametro della pupilla. Questo fa sì che la forma dell'iride sia molto più prevedibile rispetto, ad esempio, quella del volto.

Inoltre, la tessitura dell'iride si forma in maniera casuale durante la gestazione embrionale. La pigmentazione e la disposizione delle fibre radiali del muscolo sono caratteristiche pressoché uniche per ciascun individuo; è provato che le iridi di due gemelli monozigoti sono del tutto diverse le une dalle altre, che lo stesso individuo ha iride destro diverso da quello sinistro e che la probabilità di trovare sull'intero pianeta due individui con le stesse iridi sia pari a circa 10^{-78} . Mentre ci sono alcune procedure mediche e chirurgiche che possono influenzare il colore e la forma complessiva dell'iride, la tessitura rimane notevolmente stabile per molti decenni.

E' necessario considerare poi che il sistema di riconoscimento dell'iride non è invasivo: l'utente da riconoscere non deve né toccare un apparecchio recentemente toccato da un'altra persona (sconosciuto), come richiesto nel riconoscimento delle impronte digitali, né appoggiare l'occhio sul dispositivo di acquisizione, come richiesto nei sistemi di riconoscimento della retina.

Per contro il riconoscimento dell'iride è molto difficile da eseguire a una distanza più grande di qualche metro e se la persona da identificare non presta collaborazione, mantenendo la testa in posizione tale da permettere acquisizione ortogonale.

Inoltre, come per altre tecnologie biometriche il cui dato d'ingresso consiste in una fotografia, il riconoscimento dell'iride offre basse prestazioni in presenza di immagini a bassa qualità.

Per risolvere questo problema è necessario valutare attentamente le modalità e i dispositivi da impiegare per l'acquisizione dell'immagine.

Ne sistemi per il riconoscimento dell'iride possono essere individuate le seguenti fasi:

- registrazione: definita anche *enrollment*, è la fase durante la quale vengono acquisiti più campioni della stessa caratteristica biometrica e viene costruito il modello biometrico, utilizzato successivamente nell'operazione di confronto;
- riconoscimento: si ripete ogni qualvolta l'utente si presenta al punto di controllo.

A sua volta la fase di riconoscimento può essere di due tipi: *identificazione* o *verifica*.

La prima consiste in un confronto tra l'immagine acquisita relativa all'utente presente al punto di controllo e tutte le immagini presenti all'interno del database. Attraverso l'identificazione si vuole determinare se l'impronta biometrica dell'utente può essere associata a una di quelle già presenti nell'archivio.

La verifica consiste invece in un confronto uno a uno e ha l'obiettivo di determinare se vi è corrispondenza tra l'impronta biometrica della persona in esame e l'impronta individuata in archivio attraverso una dichiarazione d'identità. L'algoritmo per il riconoscimento dell'iride consta infine di cinque

passi: l'acquisizione, la segmentazione, la normalizzazione, l'estrazione di caratteristiche e la fase di confronto.

La prima fase serve a fotografare nel miglior modo possibile l'immagine da elaborare, la segmentazione per localizzare la regione dell'iride all'interno dell'immagine dell'occhio acquisita, la normalizzazione per compensare le differenze tra le regioni di iride trovate a causa delle diverse dimensioni di iridi in individui diversi e per migliorare la precisione nella fase di confronto, l'estrazione di caratteristiche per la creazione del *template biometrico* che verrà confrontato con gli altri modelli nella fase di confronto.

2.1 Acquisizione

L'acquisizione è il processo attraverso il quale viene "catturata" l'immagine del soggetto da riconoscere, e fornisce quindi il dato d'ingresso al sistema di riconoscimento vero e proprio.

Gli aspetti da tener presenti in questa fase riguardano la tipologia del dispositivo di acquisizione da utilizzare e le modalità con le quali può essere effettuata.

Inoltre, perché l'immagine acquisita possa costituire un valido dato d'ingresso del sistema di riconoscimento, deve possedere le seguenti caratteristiche [26]:

- sufficiente risoluzione: il diametro dell'iride deve contenere almeno 150 pixel ($\simeq 13$ pixel per mm) [10]
- elevato contrasto nella regione d'immagine contenente l'iride ottenuta per quanto possibile senza fonti d'illuminazione che infastidiscano il soggetto da riconoscere
- assenza di riflessioni speculari all'interno dell'iride.

Per quanto riguarda il dispositivo, si può scegliere se operare nello spettro visibile o nello spettro *NIR* (*Near InfraRed*).

Nella maggior parte dei sistemi per il riconoscimento dell'iride, l'acquisizione viene effettuata con camere *NIR* attraverso l'emissione di luce a circa 750

nm. Ciò permette di ridurre le riflessioni prodotte dalla cornea sull'iride e quindi di ridurre la quantità di rumore presente nell'immagine acquisita che altrimenti darebbe luogo a non pochi problemi in fase di estrazione delle caratteristiche per la creazione del modello biometrico.

Sebbene con tali dispositivi si ottengano immagini di buona qualità, non si riesce a catturare con dettaglio la pigmentazione dell'iride, ricca fonte d'informazione per il riconoscimento dell'iride (Fig. 2.1 b)). Questo perché i dispositivi NIR non sono sensibili alle macromolecole che costituiscono la melanina, eumelanina e feomelanina, la cui quantità determina la pigmentazione dell'iride.

Nel caso in cui il colore dell'iride non sia troppo scuro, è possibile effettuare l'acquisizione utilizzando dispositivi funzionanti nello spettro visibile [27], i quali permettono di ottenere nell'immagine anche la rappresentazione della pigmentazione dell'iride (Fig. 2.1 a)). Per quanto concerne le modalità di



Figura 2.1: Confronto tra modalità di acquisizione: acquisizione nello spettro del visibile (sinistra) e nello spettro del vicino infrarosso (NIR) (destra) .

acquisizione dell'immagine, a seconda del livello di cooperazione del soggetto da identificare, distinguiamo:

- acquisizione *ortogonale*: utilizzata nel contesto del riconoscimento cooperativo, può essere effettuata solo se l'utente partecipa attivamente durante la fase di acquisizione mantenendo in posizione fissa la testa,

in modo che il centro dell'iride si trovi in asse con il centro ottico del dispositivo di acquisizione. In questo caso è possibile acquisire un'immagine che rispetti i vincoli imposti perché possa rappresentare un dato valido.

- acquisizione *non ortogonale*: utilizzata nel contesto del riconoscimento non cooperativo, in cui viene a mancare la collaborazione dell'utente, l'immagine viene acquisita senza imporre alcun vincolo sull'angolazione dello sguardo e sulla posizione della testa. Iride e centro ottico della camera non sono in questo caso allineati.

L'immagine così ottenuta non può essere usata direttamente per il

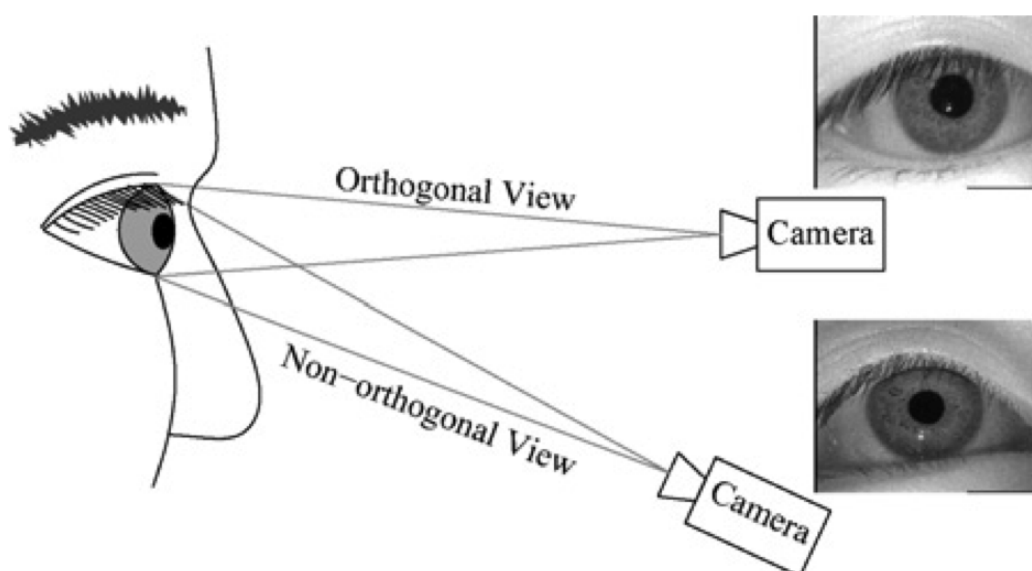


Figura 2.2: Geometrie d'acquisizione.

riconoscimento poiché l'iride appare distorta, e da circolare diventa di forma ellittica (Fig. 2.2). Tali distorsioni possono dar luogo a errori sia in fase di segmentazione che in fase di normalizzazione, precludendo la costruzione di un modello biometrico affidabile.

2.2 Segmentazione

La segmentazione costituisce il primo passo nell'elaborazione dell'immagine acquisita e consiste nell'estrazione della regione dell'iride dall'immagine digitale.

La regione dell'iride può essere approssimata da due cerchi, uno per il contorno iride/sclera e un altro, interno al primo, per il contorno iride/pupilla. Ciglia e palpebre possono in alcuni casi occludere le parti inferiori e superiori di tale regione e per questo motivo, oltre a localizzare la regione d'interesse, si applicano tecniche per escludere dalla regione le parti occluse in modo da non introdurre degli artefatti in fase di normalizzazione.

Il successo della segmentazione dipende strettamente dalla qualità d'immagine.

Ad esempio immagini a basso contrasto ottenute fotografando, in condizione di illuminazione naturale, soggetti le cui iridi sono caratterizzate da una pigmentazione più scura, risultano assai più difficili da segmentare.

La fase di segmentazione è fondamentale per il successo di un sistema di riconoscimento dell'iride poiché, un dato segmentato in maniera errata, corromperà il modello biometrico causando incertezza in fase di confronto.

In letteratura vengono presentate diverse tecniche di segmentazione, tra le quali le più famose sono quella basata sulla *trasformata di Hough* [21] [14] e quella proposta da *Daugman* [4].

2.2.1 Trasformata di Hough

La trasformata di Hough è un'algoritmo usato comunemente nel contesto dell'elaborazione di immagini per determinare i parametri di figure geometriche semplici all'interno di un'immagine. Nel contesto di un algoritmo di riconoscimento dell'iride può quindi essere usata per ricavare raggi e centri dei contorni corrispondenti a iride e pupilla (*CHT: Circular Hough Transform*).

La trasformata di Hough può essere vista come una trasformazione di un punto dal piano (x, y) dell'immagine allo spazio dei parametri, definito in base alla figura geometrica da identificare.

Per il cerchio la ricerca avviene in uno spazio tridimensionale, essendo la

rappresentazione parametrica della circonferenza:

$$x = x_c + r \cos \theta$$

$$y = y_c + r \sin \theta$$

Lo spazio dei parametri è quindi definito dalle coordinate dei centri, (x_c, y_c) , e dai valori dei raggi r delle circonferenze. L'identificazione della regione d'interesse avviene attraverso i passi previsti dall'algoritmo:

1. filtraggio dell'immagine da processare con filtro mediano 10 x 10 pixel per rimuovere i falsi contorni (Fig. 2.3);
2. estrazione dei contorni presenti nell'immagine filtrata con il *metodo di Canny* (Fig 2.4);
3. per ogni punto appartenente al contorno si disegna un cerchio con centro in tale punto e raggio r ;
4. si incrementano, all'interno di una matrice di accumulazione, tutte le coordinate dei punti che definiscono il perimetro del cerchio tracciato;
5. si ricerca il punto di massimo nella matrice di accumulazione le cui coordinate corrispondono ai parametri della circonferenza identificata (Fig. 2.5).

Ottenute le coordinate della circonferenza che meglio approssima il contorno iride-sclera all'interno dell'immagine, si estrae la regione d'interesse in modo che essa contenga solo la porzione d'immagine relativa all'iride (Fig.2.6).

Per l'identificazione di eventuali occlusioni causate da ciglia e palpebre si fa riferimento al metodo proposto da *Wildes et al., Kong e Zhang* [15]. Il metodo sfrutta la trasformata di Hough parabolica per identificare, all'interno dell'immagine le palpebre superiore e inferiore, approssimandole con degli archi parabolici definiti da:

$$((y - k_j) \cos \theta_j - (x - h_j) \sin \theta_j)^2 = a_j((x - h_j) \cos \theta_j + (y - k_j) \sin \theta_j) \quad (2.1)$$

dove a_j è il parametro che controlla la curvatura, (h_j, k_j) sono le coordinate del picco della parabola e θ_j è l'angolo di rotazione relativo all'asse orizzontale.

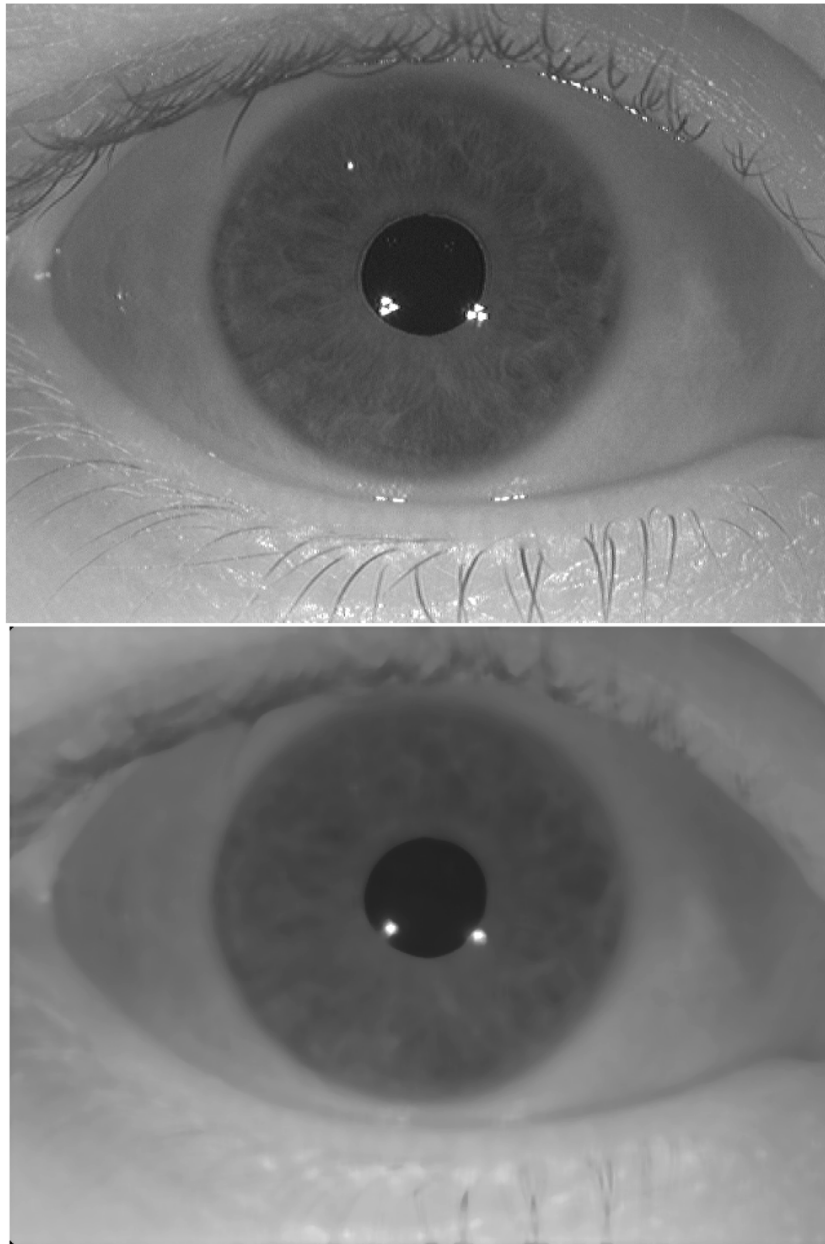


Figura 2.3: Filtro mediano: in alto compare l'immagine originale, in basso quella ottenuta dopo l'applicazione del filtro mediano.

In ogni caso, le intensità presenti in corrispondenza dei punti di occlusione vengono memorizzati in una matrice delle stesse dimensioni della regione segmentata, in modo che, in fase di codifica e confronto delle feature, tali

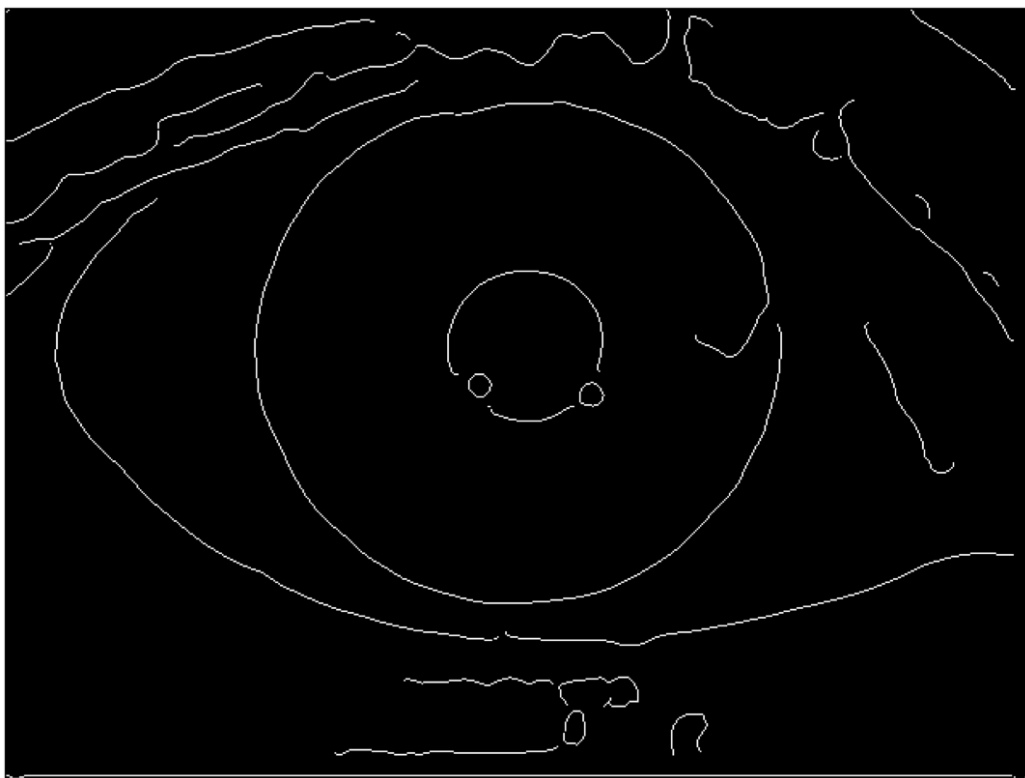


Figura 2.4: Mappa dei contorni.

regioni non vengano considerate.

La segmentazione ottenuta con la trasformata di Hough, presenta alcuni problemi. Prima di tutto, richiede di scegliere un valore di soglia per la ricerca dei contorni; la scelta di un valore di soglia non esatto può dar luogo alla rimozione di alcuni punti del contorno e quindi, alla non identificazione dei contorni circolari.

In secondo luogo, basandosi su un approccio di ricerca a forza bruta, implica un carico computazionale elevato.

2.2.2 Metodo di Daugman

Il metodo di Daugman [4] prevede l'utilizzo di un operatore integro-differenziale appositamente costruito per localizzare le regioni circolari di iride e pupilla, e gli archi che definiscono i contorni delle palpebre.

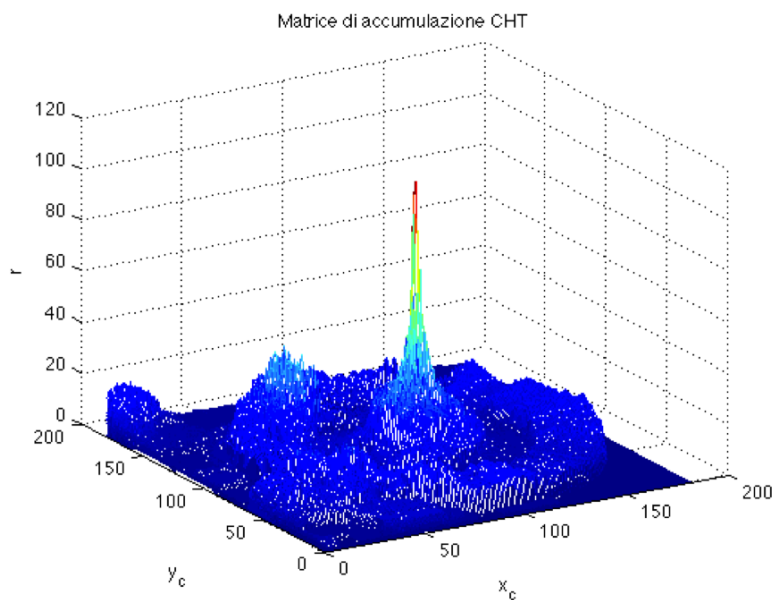


Figura 2.5: La matrice di accumulazione.

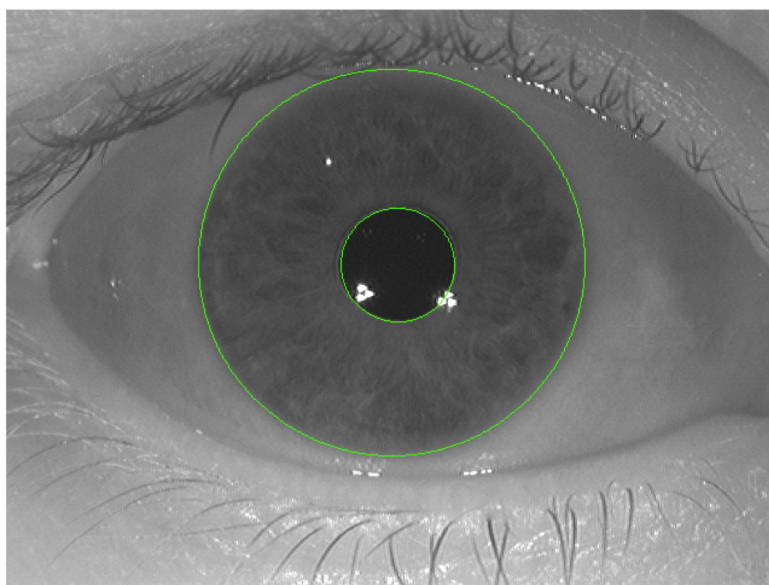


Figura 2.6: Immagine segmentata.

Assumendo pupilla e iride di forma circolare, l'operatore si presenta come un rilevatore di bordo circolare definito come:

$$\max_{(r,x_0,y_0)} \left| G_\sigma(r) * \frac{\partial}{\partial r} \oint_{(r,x_0,y_0)} \frac{I(x,y)}{2\pi r} ds \right| \quad (2.2)$$

dove $I(x,y)$ è il valore d'intensità dell'immagine acquisita nel punto (x,y) , r corrisponde al raggio delle circonferenza da cercare, s rappresenta il percorso circolare definito da (r,x_0,y_0) e $G_\sigma(r)$ è un filtro Gaussiano definito come:

$$G_\sigma(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (2.3)$$

Applicando all'immagine l'operatore integro-differenziale si ricerca, tra i contorni circolari definiti facendo variare i parametri (r,x_0,y_0) , quello in corrispondenza del quale si ottiene la massima variazione in termini di intensità di pixel. Tale procedura viene applicata iterativamente diminuendo progressivamente i parametri di *smoothing* della funzione Gaussiana, in modo da ottenere una localizzazione sempre più precisa.

Per la localizzazione delle palpebre si utilizza lo stesso operatore in cui, però, viene considerato come cammino d'integrazione un arco di parabola anziché una circonferenza.

La tecnica di Dugman può essere quindi vista come una variante del metodo della trasformata di Hough, dato che sfrutta la derivata prima dell'immagine acquisita ed effettua la ricerca per determinare i parametri geometrici associati ai contorni. Inoltre, siccome lavora direttamente sulle informazioni estratte dalla derivata prima dell'immagine, il metodo di Daugman consente di evitare i problemi associati alla scelta errata del valore di soglia per la costruzione della mappa dei contorni, presenti invece nel metodo di Hough. Tuttavia, l'algoritmo di Daugman può fallire nel caso in cui l'immagine contenga molto rumore, ad esempio riflessioni speculari a cui sono associate alte variazioni d'intensità. Ciò accade poiché l'operatore di Daugman lavora solo su scala locale.

2.2.3 Altri algoritmi di segmentazione

In figura 2.7 si presenta una panoramica delle principali tecniche di segmentazione dell'iride recentemente pubblicate; nella seconda colonna viene

riportato il set di dati su cui sono stati fatti gli esperimenti, nella terza vengono riportate le tecniche di pre-elaborazione usate, nella quarta viene elencato l'ordine con il quale i contorni sono stati segmentati (P : denota il contorno della pupilla mentre S : indica il contorno sclera-iride) e nelle colonne successive viene data una breve descrizione del metodo di segmentazione. E' necessario tener presente che la maggioranza dei metodi elencati opera su immagini acquisite con dispositivi nell'infrarosso (NIR), che in genere offrono elevato contrasto tra la regione della pupilla e quella dell'iride; ciò giustifica generalmente l'ordine con cui sono stati segmentati.

Sono state di recente proposte anche modifiche i cosiddetti *fitting methods*, in sostanza per rendere gestibili le immagini acquisite off-angle.

Infine, per minimizzare gli errori in fase di segmentazione dovuti a occlusioni, sono stati introdotti modelli parabolici, ellittici unitamente all'analisi modale dell'istogramma dell'immagine.

Rimane comunque il fatto che diversi autori, hanno riscontrato che, in condizioni rumorose, il successo dei loro metodi è limitato ai casi di immagini ortogonali, all'assenza di gravi occlusioni e riflessioni speculari.

2.3 Normalizzazione

Dopo aver estratto correttamente la regione dell'iride dall'immagine acquisita attraverso segmentazione, il passo successivo consiste nel normalizzare la regione estratta, in modo che abbia dimensioni fisse e quindi possa essere confrontata con altre immagini di iride.

Incoerenze dimensionali tra diverse immagini sono principalmente dovute alla dilatazione/contrazione dell'iride, causate dalla contrazione/dilatazione della pupilla in condizione di illuminazione variabile. Distanza di acquisizione, rotazione della camera, posizione della testa e rotazione del bulbo oculare rappresentano altre condizioni che possono dar luogo a immagini tra loro non confrontabili poiché contenenti iridi di dimensioni differenti.

Attraverso l'operazione di normalizzazione, le immagini vengono elaborate in modo che le regioni dell'iride abbiano le stesse dimensioni; così facendo due fotografie della stessa iride, ottenute in condizioni diverse, avranno le stesse

Method	Experiment	Preprocessing	Ord. Borders	Pupillary Border	Scleric Border
Zuo et al.	CASIA.1 ICE, WVU (NIR)	Specular reflections detected, PDE and inpainting	P → S	Randomized Elliptical Hough Transform	Weighted Integro-differential operator
Puhan et al.	UBIRIS (VW)	Image binarization (threshold of the local Fourier spectral density)	S	-	Construction of a set of unidimensional signals, gradient analysis
Ross and Shah	CASIA.1 WVU (NIR)	2-D Median filter	P → S	Binarization (threshold), Circular Hough Transformation	Geodesic Active Contours
Morimoto et al.	Non specified (NIR)	Not described	P → S	Image difference	Images cascade at different scales, Sobel edges detection, elliptical form fitting
Liu et al.	ICE (NIR)	Not described	P → S	Angular constrained Canny edge detection, Hough-based transform	Hough-based form fitting, hypothesis and test process
Kennell et al.	BATH (NIR)	Histogram equalization, image binarization	P → S	Morphological operators, integro-differential operator	Image binarization based on pixels neighborhood variance, form fitting
Vatsa et al.	UBIRIS CASIA.v3 (NIR, VW)	Not described	P → S	Rough estimation according to an elliptical model, followed by a modified Mumford-Shah functional	Process similar to the papillary border
Proença and Alexandre	UBIRIS (VW)	Histogram equalization	S → P	Feature extraction and fuzzy clustering to reduce image heterogeneity, Canny edges detection and circular hough transform	Process similar to the papillary border
Zaim	CASIA.1 (NIR)	Morphologic operators to eliminate eyelashes	S → P	Split and merge process to localize regions of uniform intensity	Image normalization based on pupil coordinates, Sobel filtering, detection of horizontal edges in the normalized image
Broussard et al.	BATH (NIR)	Not described	P,S	Extraction of local texture features, feed forward neural network	Process similar to the papillary border
He and Shi	Non specified (NIR)	Image binarization, morphologic operations	P → S	Geometrical projection methods, Sobel filtering, form fitting	Canny edge extraction, Hough transform
Basit and Javed	BATH (NIR)	Image binarization, morphologic operations	P → S	Iterative bijections-based method	Maximization of the difference of intensities of radial direction
Arvacheh and Tizhoosh	CASIA.1 (NIR)	Not described	P → S	Near circular active contour model (snakes), interpolation process to improve performance	Integro-differential operator
Daugman	ICE (NIR)	Not described	P → S	Active contours based on Fourier series, modeled with 17 discrete Fourier coefficients	Active contours based on Fourier series, modeled with 4 discrete Fourier coefficients
He et al.	CASIA.1 (NIR)	Not described	P → S	Adaboost based object detection, iterative circumference shifting	Image normalization, Sobel and Canny filtering, line fitting
Zheng et al.	SJTU (VW)	Conversion into Hsv color space	P → S	Assume existence of specular reflections, maximization of integral projections, integro-differential operator	Iterative shift, shrink and expand circumference process to minimize average intensity
Xu and Shi	CAS-PEAL (VW)	Not described	P → S	Integral projection functions, median filtering, circumference shifting based on average intensity minimization	Sobel filtering, Edges weighting according to position and curvature
Dobes et al.	AR, CVL (VW)	Histogram equalization, Gaussian blur	S	-	Canny edges detection, Angular constrained Hough transform
Shuckers et al.	WVU (NIR)	Remove specular reflections, inpainting	P → S	Elliptical integro-differential operator	Elliptical integro-differential operator
Tan et al.	UBIRIS.v1, UBIRIS.v2	Image clustering to perform rough eye localization	P,S	Integro-differential constellation	Integro-differential constellation

Figura 2.7: Visione d'insieme dei più rilevanti metodi di segmentazione pubblicati di recente.

caratteristiche biometriche nella medesima posizione.

2.3.1 Daugman's Rubber Sheet Model

Il modello di normalizzazione pensato da Daugman [18], prevede il riposizionamento di ogni punto della regione dell'iride estratta, in uno spazio definito dalle coordinate (r, θ) , dove con r si intende la posizione radiale, compresa nell'intervallo $[0,1]$, e con θ la posizione angolare compresa nell'intervallo $[0,2\pi]$.

La ricollocazione dei punti appartenenti alla regione dell'iride dallo spazio Cartesiano a quello in coordinate polari normalizzate viene modellato come:

$$I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \rightarrow I(r, \theta)$$

con:

$$x(r, \theta) = (1 - r)x_p(\theta) + rx_l(\theta)$$

$$y(r, \theta) = (1 - r)y_p(\theta) + ry_l(\theta)$$

dove $I(x, y)$ rappresenta la regione dell'iride, (x, y) sono le coordinate cartesiane originali, (r, θ) sono le corrispondenti coordinate polari normalizzate, x_p, y_p e x_l, y_l indicano rispettivamente le coordinate dei punti del contorno della pupilla e dell'iride per un certo angolo θ .

A valle della trasformazione si otterrà quindi una matrice rettangolare, che

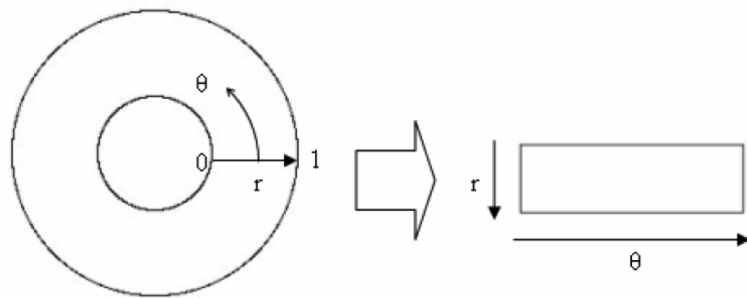


Figura 2.8: Schema di normalizzazione di Daugman.

prende il nome di *rubber sheet*, contenente la regione dell'iride normalizzata

in cui il numero di righe N_r dipende dalla risoluzione radiale dr mentre il numero di colonne N_θ è legato alla risoluzione angolare $d\theta$, figura 2.8.

In figura 2.9 viene rappresentato un esempio di normalizzazione effettuata

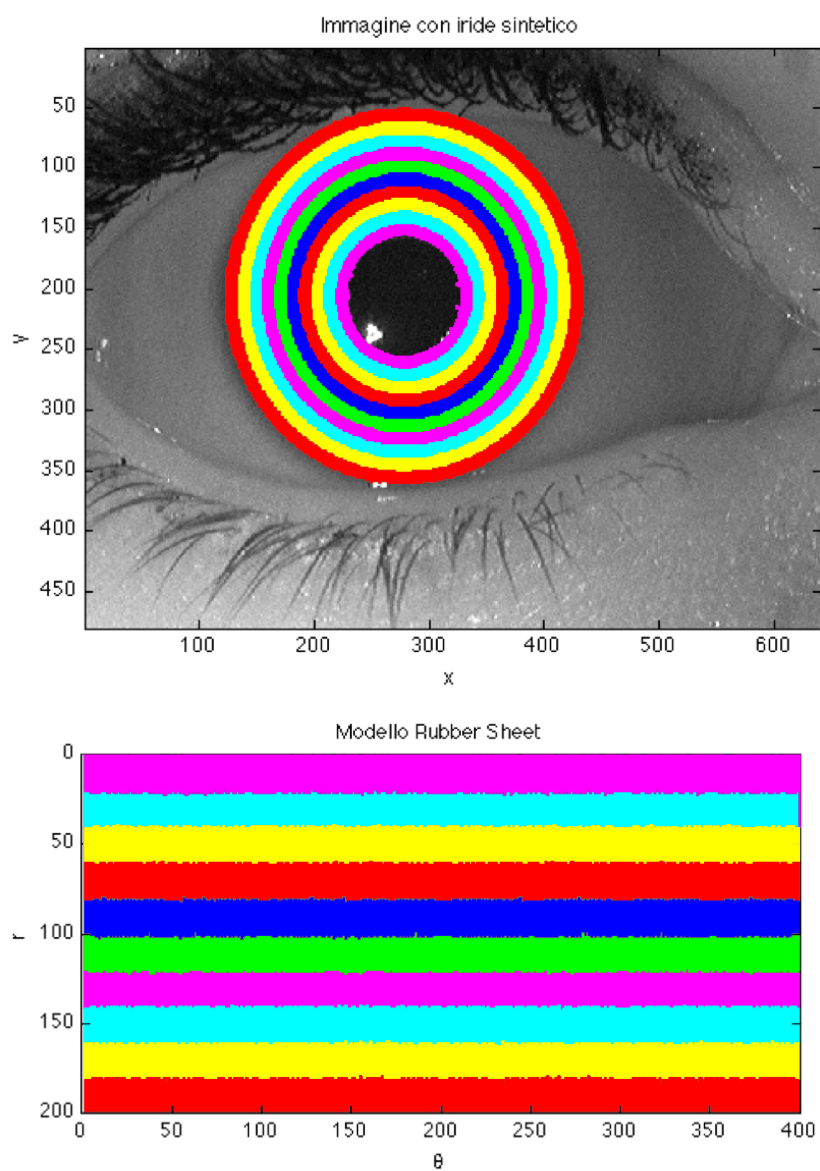


Figura 2.9: Esempio di normalizzazione: immagine sintetica.

con il metodo di Daugman considerando pupilla e iride concentriche; per evidenziare il significato della trasformazione, abbiamo inserito un'iride sintetica

caratterizzata da una *texture* all'interno della quale compaiono 10 corone circolari. Dopo aver effettuato la segmentazione dell'immagine ed aver quindi ottenuto la regione contenente l'iride sintetica, abbiamo costruito il modello rubber sheet campionando su $Nr = 200$ punti la direzione radiale e su $N_\theta = 400$ punti la direzione angolare.

Partendo dalla regione circolare dell'iride presente nell'immagine, la normalizzazione produce quindi una matrice bidimensionale in cui la singola riga rappresenta i valori d'intensità dei punti confinati all'interno di una corona circolare con spessore dr .

Le variazioni di dimensione dell'iride vengono tenute in conto modellando l'iride stesso con questa matrice rettangolare in cui i punti appartenenti al contorno esterno risultano vincolati rispetto al centro della pupilla, che viene assunto come punto di riferimento.

Tuttavia, è necessario tener presente che pupilla e iride possono non essere concentriche. In questo caso, non essendo più il punto di riferimento centrato rispetto all'iride, la distanza tra bordo pupilla e bordo iride non è costante ma varia in funzione dell'angolo considerato come descritto in [18] attraverso:

$$r' = \alpha\beta \pm \sqrt{(\alpha\beta)^2 - \alpha^2 - r_I^2} \quad (2.4)$$

con:

$$\alpha^2 = o_x^2 + o_y^2$$

$$\beta = \cos \left(\pi - \arctan \left(\frac{o_y}{o_x} \right) - \theta \right)$$

dove: o_x e o_y rappresentano lo scostamento del centro della pupilla rispetto al centro dell'iride, r' rappresenta la distanza tra il contorno della pupilla e il contorno dell'iride per un dato angolo θ , e r_I è il raggio dell'iride (Fig. 2.11).

Dal punto di vista pratico, dovendo considerare un numero fisso di punti per la costruzione del modello rubber sheet, la riscalatura implica un campionamento radiale variabile in funzione del valore angolare considerato.

Inoltre, oltre al modello rubber sheet, in base alle informazioni ottenute in fase di segmentazione su eventuali occlusioni si costruisce una maschera delle stesse dimensioni del modello in modo da marcare le zone rumorose, quelle interessate da riflessioni speculari o da occlusioni; infine, per non infettare

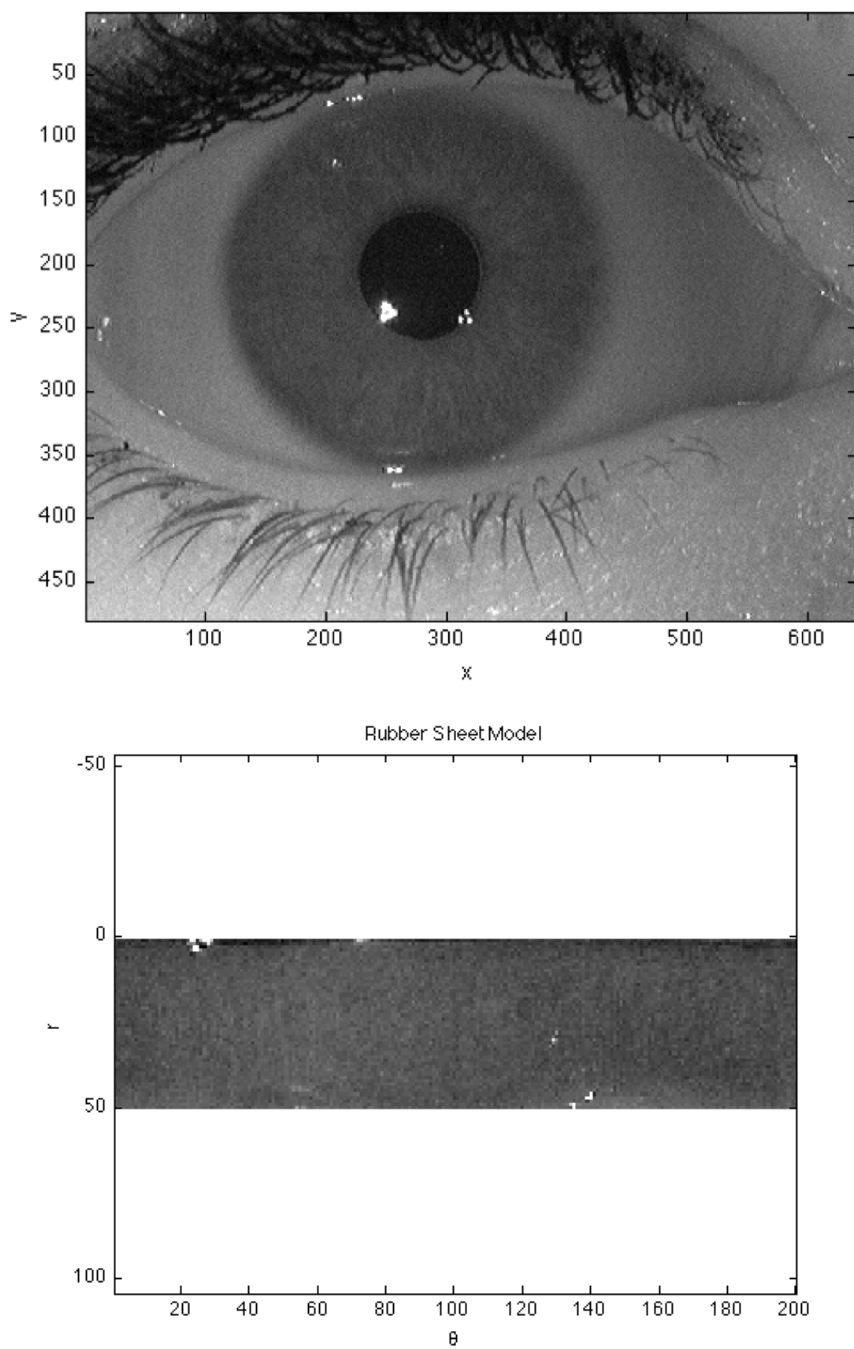


Figura 2.10: Esempio di normalizzazione: immagine reale .

l'immagine normalizzata con i punti che non appartengono alla regione del-

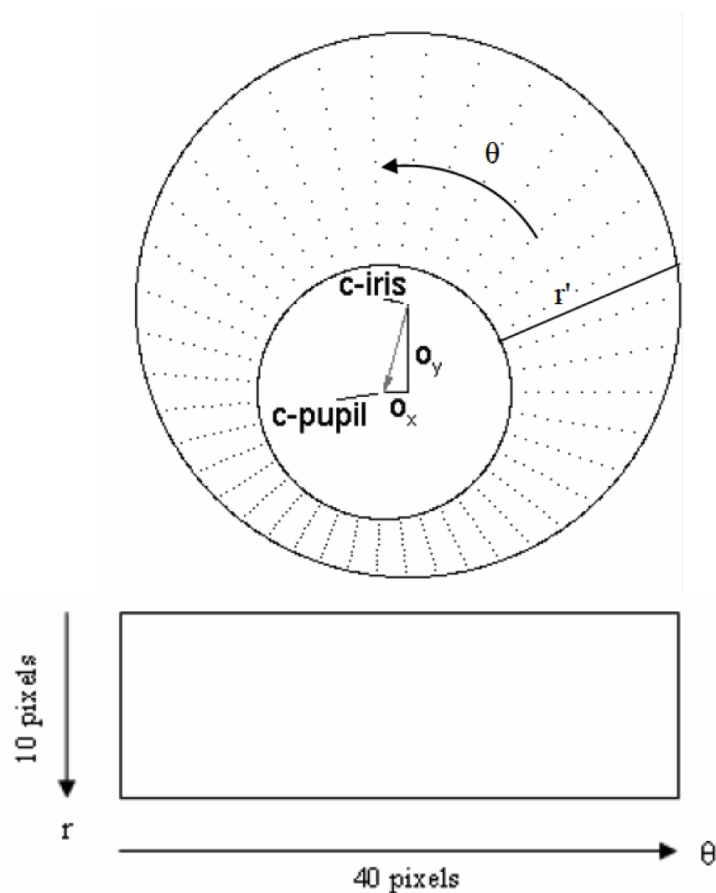


Figura 2.11: Schema di normalizzazione.

l'iride, si scartano dal modello normalizzato i punti giacenti sul bordo della pupilla e sul bordo dell'iride.

Sebbene l'algoritmo di normalizzazione tenga conto delle variazioni di dimensione che si possono ottenere nelle diverse regioni di iride, acquisite ad esempio a distanza variabile ed estratte in fase di segmentazione, il modello ottenuto a valle della normalizzazione contiene al suo interno degli errori. Tali errori sono dovuti al fatto che una contrazione della pupilla non dà luogo a una dilatazione lineare della texture dell'iride.

Campionando uniformemente in direzione radiale, pur se in funzione dell'angolo per tenere conto dell'offset tra i centri di pupilla e iride, si commette un errore poiché si considera implicitamente l'effetto di contrazione ed espan-

sione dell'iride come un fenomeno lineare e dipendente dalle sole dimensioni della pupilla.

Come si vede dalla figura 2.12, attraverso la normalizzazione lineare di Daugman, due immagini della stessa iride ma catturate in condizioni di illuminazione differente risultano parzialmente disallineate.

Per tener conto della deformazione non lineare dell'iride in fase di norma-



Figura 2.12: Errori in fase di normalizzazione.

lizzazione, si può descrivere la posizione di ciascun punto all'interno della regione dell'iride, come descritto in [23], attraverso:

$$R_{nonlinear} = R_{linear} + \Delta R(p, r)$$

dove R_{linear} è la posizione che si otterrebbe in presenza della deformazione lineare e ΔR è la deviazione additiva dipendente da R_{linear} (r) e dalla dilatazione della pupilla (p).

Sempre in [23] si trova che il legame tra R_{linear} e ΔR può essere rappresentato con una funzione Gaussiana (Fig. 2.13):

$$\Delta R = \frac{C}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(R_{linear} - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$$

dove:

- C è il fattore di deformazione che indica il grado di deformazione calcolato in funzione delle dimensioni di iride e pupilla;
- (μ, σ^2) : media e varianza della funzione Gaussiana ricavati attraverso analisi effettuate su un set di dati di training contenente per più soggetti, diverse immagini dello stesso individuo ottenute in condizioni di illuminazione progressivamente crescente.

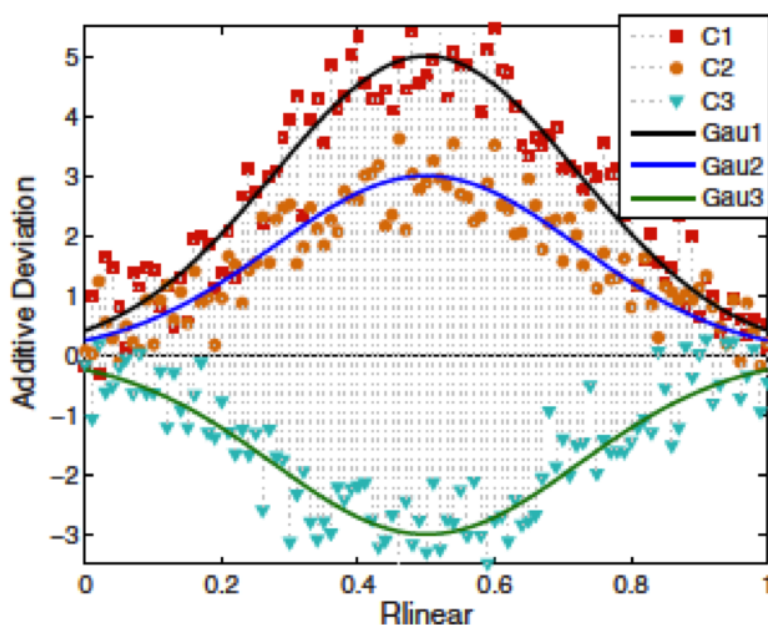


Figura 2.13: Modellizzazione delle distorsioni non lineari.

2.4 Estrazione e codifica delle feature

In questa fase dell'algoritmo di riconoscimento, il pattern normalizzato dell'iride viene processato al fine di estrarre le caratteristiche biometriche che costituiranno il modello biometrico, utilizzato in fase di confronto.

Tra le caratteristiche disponibili vanno estratte solamente le più distintive, ovvero quelle che faranno del modello biometrico il più rappresentativo possibile.

In letteratura sono disponibili diversi algoritmi di codifica del pattern normalizzato, che si differenziano uno dall'altro in base al tipo di filtraggio effettuato sul dato in ingresso [18].

Generalmente il filtraggio viene eseguito utilizzando la *trasformata wavelet* poiché rispetto alla trasformata di Fourier classica, localizzata solo in frequenza, la trasformata wavelet è localizzata sia nel tempo che nelle frequenze e, attraverso un'analisi multirisoluzione, consente di ottenere una miglior rappresentazione del segnale.

L'obiettivo del filtraggio è quello di rappresentare le informazioni presenti nella regione dell'iride attraverso componenti localizzate e a diversa risoluzione, dove la diversa risoluzione si estrae variando il valore di scala del filtro utilizzato.

Il dato filtrato viene infine codificato in modo da produrre un modello biometrico, ovvero una rappresentazione compatta delle informazioni contenute nella regione dell'iride. Questo sarà oggetto di confronto durante la fase di riconoscimento.

Per fornire una panoramica sulle procedure necessarie per l'estrazione e la codifica delle feature biometriche, si descrive uno dei metodi trattati in letteratura.

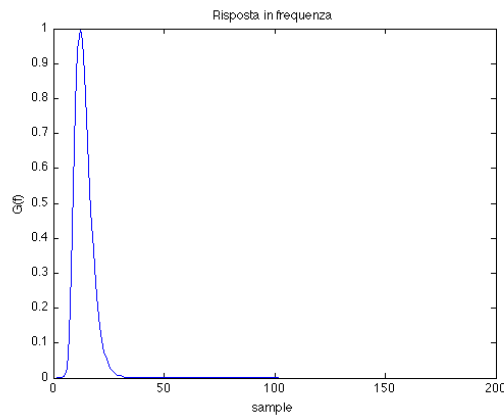
Tale algoritmo [13] prevede:

1. suddivisione del template normalizzato per righe: ogni riga del modello normalizzato rappresenta i valori d'intensità presenti all'interno di una singola corona circolare, ovvero il segnale da filtrare;
2. costruzione del filtro monodimensionale di tipo Log-Gabor (Fig. 2.14), la cui risposta in frequenza è definita da:

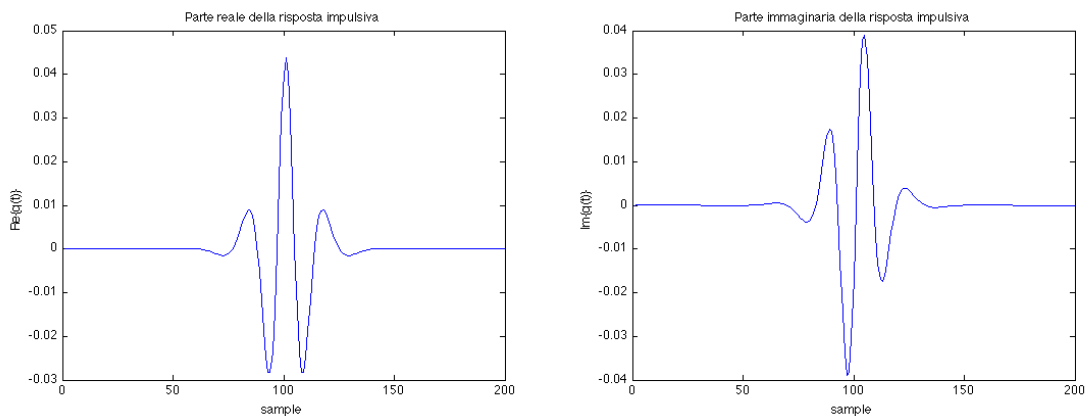
$$G(f) = \exp \left[\frac{- \left(\log \left(\frac{f}{f_0} \right) \right)^2}{2 \left(\log \left(\frac{\sigma}{f_0} \right) \right)^2} \right] \quad (2.5)$$

dove f_0 è la frequenza centrale e σ rappresenta la banda del filtro;

3. filtraggio del template: per ogni funzione d'intensità estratta, si calcola la FFT (Fast Fourier Transform) e la si moltiplica per la risposta in frequenza del filtro di Gabor;



(a) *Risposta in frequenza di una wavelet di tipo Log-Gabor con $\sigma = 0.075$ e $f_0 = 0.0556$.*

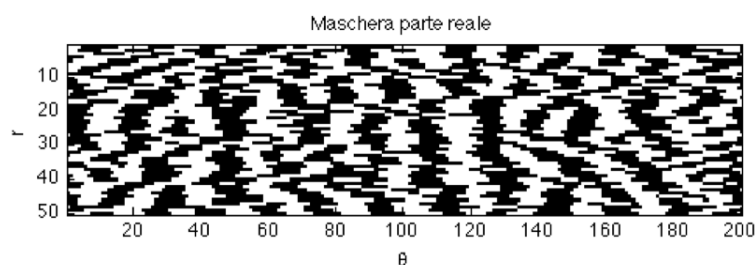


(b) *Parte reale della risposta impulsiva .* (c) *Parte immaginaria della risposta impulsiva .*

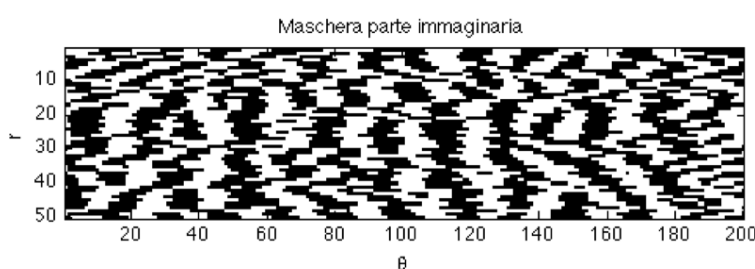
Figura 2.14: Wavelet Log-Gabor.

4. codifica delle caratteristiche: dopo aver calcolato la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) del dato filtrato, questo viene quantizzato in fase utilizzando quattro livelli. La quantizzazione di fase si ottiene valutando i valori d'ampiezza complessi del dato attraverso due maschere binarie, una per la parte reale e una per la parte immaginaria (Fig. 2.15).

La maschera relativa alla parte reale conterrà "1" laddove la parte reale del dato filtrato risulterà maggiore di zero e "0" altrove, e così anche per la maschera associata alla parte immaginaria.



(a) *Maschera binaria associata alla parte reale.*



(b) *Maschera binaria associata alla parte immaginaria.*

Figura 2.15: Quantizzazione di fase.

Le zone in cui il dato filtrato assume valori d'ampiezza pressoché nulli vengono memorizzate in una terza maschera che verrà utilizzata per marcare le eventuali zone di rumore.

5. costruzione del modello biometrico: la codifica binaria dell'iride, segmentato e normalizzato, si ottiene, accostando colonna per colonna le due maschere binarie (Fig. 2.16). Il modello, o template, biometrico ottenuto viene anche chiamato *Iris Code*.

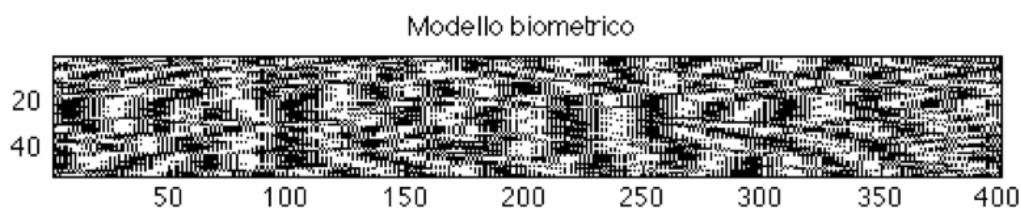


Figura 2.16: Iris Code.

Per introdurre un'analisi multirisoluzione è possibile utilizzare, invece che un unico filtro, un banco di filtri wavelet dove ciascun filtro, costruito scalando la funzione base (primo filtro), è dedicato all'estrazione di caratteristiche associate a un diverso livello di risoluzione [3] [17].

Il numero totale di bit componenti l'Iris Code ottenuto sarà pari a:

$$N_{IC} = N_r \cdot N_\theta \cdot 2 \cdot N_f$$

dove:

- N_r : numero di righe del modello normalizzato legato alla distanza tra contorno della pupilla e contorno dell'iride (formula 2.4):

$$N_r = \frac{r'}{dr}$$

- N_θ : numero di colonne del modello normalizzato:

$$N_\theta = \frac{360^\circ}{d\theta}$$

- N_f : numero di filtri che compongono il banco di filtri.

La scelta dei parametri che caratterizzano un filtro è molto importante poiché influenza la qualità dei risultati ottenibili.

2.5 Matching

È l'ultimo passo svolto da un algoritmo di riconoscimento, in cui si confrontano due o più modelli biometrici per stabilire se il modello corrente è riconducibile a uno dei modelli presenti all'interno di un database appositamente creato attraverso la registrazione di un certo numero di utenti.

Nella maggior parte degli algoritmi per il riconoscimento dell'iride, la metrica attraverso la quale viene stabilito il livello di similitudine tra due modelli biometrici in fase di confronto è la *distanza di Hamming*.

La distanza di Hamming fornisce una misura di quanti bit uguali sono presenti all'interno di due modelli biometrici, ottenuti elaborando immagini acquisite diverse. Attraverso questa misura è possibile capire se due modelli

biometrici sono stati ottenuti partendo da immagini di iridi differenti o di iridi appartenenti alla stessa persona.

Nel confronto tra due modelli biometrici, X e Y , la distanza di Hamming (HD), è definita come la somma sul numero totale di bit (N) che costituisce il singolo modello biometrico, dei bit differenti, e normalizzata per il numero totale di bit:

$$HD = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j \oplus Y_j \quad (2.6)$$

dove \oplus indica l'OR esclusivo (XOR) tra le due sequenze di bit.

La distanza di Hamming può quindi assumere quindi valori compresi nell'intervallo $[0, 1]$, dove "0" indica che i due pattern confrontati risultano identici. Dato che la regione dell'iride contiene caratteristiche con un numero elevato di gradi di libertà, a ciascun iride corrisponderà un modello biometrico indipendente da quello associato a un iride diverso; d'altra parte, due Iris Code generati dalla stessa iride risulteranno estremamente correlati.

Se due modelli biometrici sono completamente indipendenti, come nel caso di template generati a partire da iridi differenti, la distanza di Hamming sarà pari a circa 0.5. Questo perché l'indipendenza implica che i due Iris Code siano totalmente casuali, e quindi che la probabilità di trovare un "1" in una determinata posizione coincide con la probabilità di trovare uno "0"; in questo caso solo la metà dei bit considerati per il confronto risulterà coincidere.

Nel caso in cui, invece, si effettua il confronto tra due modelli provenienti dalla stessa iride, la distanza di Hamming tra i due dovrebbe risultare 0 o meno di eventuali errori numerici introdotti durante le fasi di segmentazione o estrazione e codifica delle caratteristiche.

Volendo rendere più affidabile il risultato ottenuto in fase di matching, è possibile includere le informazioni sulle eventuali occlusioni sfruttando le maschere di rumore create durante le fasi precedenti, a partire dalla segmentazione.

Sulla base di tali informazioni, la distanza di Hamming tra due modelli biometrici viene calcolata considerando solo i bit considerati utili per il con-

fronto, ovvero i bit associati alla parti di iride non disturbate da occlusioni o riflessioni speculari; ciò significa che la distanza verrà calcolata solo per quei bit appartenenti all'iride a cui corrispondono degli zeri nella maschera di rumore.

Il calcolo della distanza di Hamming, tenendo conto delle maschere di rumore, si effettua modificando la formula 2.6 con:

$$HD = \frac{1}{N - \sum_{k=1}^N X_k^{(noise)} + Y_k^{(noise)}} \sum_{j=1}^N X_j \oplus Y_j \cdot X_j^{(noise)} \cdot Y_j^{(noise)} \quad (2.7)$$

dove:

- $X^{(noise)}, Y^{(noise)}$: maschere di rumore relative ai due modelli biometrici;
- X, Y : Iris Code da confrontare;
- $N - \sum_{k=1}^N X_k^{(noise)} + Y_k^{(noise)}$: numero di bit utili, e perciò coinvolti nel confronto;
- " \oplus " rappresenta l'operatore OR esclusivo, "." l'operatore AND e "+" l'operatore OR.

Sebbene teoricamente, a due Iris Code relativi alla stessa iride, dovrebbe corrispondere distanza di Hamming pari a 0, in pratica questo potrebbe non accadere. In fase di normalizzazione può avvenire che, a causa di eventuali imprecisioni nella costruzione dei modelli normalizzati, non vengano identificate delle regioni di disturbo; queste si presenteranno come delle piccole variazioni all'interno dei due Iris Code.

Per tener conto delle incongruenze presenti nei modelli normalizzati e riconducibili a piccoli disallineamenti tra iride e camera, in fase di confronto, uno dei due modelli biometrici viene spostato a destra e a sinistra di un certo numero di bit. Questo tipo di spostamento del modello normalizzato, nello spazio Cartesiano (x, y) a cui appartiene la regione segmentata, si traduce in

una rotazione, dove l'angolo di rotazione θ_r dipende dalla risoluzione angolare utilizzata, $d\theta$, e dal numero di bit di spostamento, N_{shift} :

$$\theta_r = \pm d\theta \cdot N_{shift} \quad (2.8)$$

dove il "+" vale per spostamenti verso destra e il "-" per spostamenti verso sinistra.

Tenendo presente che ogni filtro fornisce due bit d'informazione per ogni pixel del modello normalizzato, lo spostamento avverrà con un passo pari a:

$$d_{shift} = N_f \cdot 2$$

Infine, per ogni spostamento, viene calcolata la distanza di Hamming e tra tutte quelle calcolate si considera quella più piccola.

2.6 Riconoscimento dell'individuo

Considerando i template biometrici contenuti all'interno del database, la bontà di un sistema di riconoscimento dell'iride è strettamente legata alla sua capacità di distinguere iridi appartenenti agli stessi individui, da iridi appartenenti a soggetti diversi.

Solitamente un database, oltre a contenere immagini appartenenti a diversi utenti, contiene anche più immagini appartenenti allo stesso soggetto, acquisite in condizioni leggermente diverse.

Dai test effettuati sul database completo è possibile ricavare:

- distribuzione delle distanze di Hamming inter-classe: è ottenuta calcolando, per tutte le combinazioni di soggetti diversi, la distanza tra i template biometrici contenuti all'interno del database; dà una misura di unicità delle iridi contenute nel database. In accordo con la teoria, il valor medio di questa distribuzione è pari a 0.5 poiché, se i due template sono indipendenti tra loro, la probabilità di trovare un "1" in una determinata posizione è uguale alla probabilità di trovare "0" e coincide con 0.5.

In realtà il valor medio ottenuto risulta leggermente inferiore per effetto

della correzione prevista per tener conto delle incongruenze da rotazione; considerando tale correzione la distanza di Hamming più piccola viene infatti considerata come la distanza corretta.

- distribuzione delle distanze di Hamming intra-classe: dato che modelli biometrici appartenenti allo stesso individuo possono dare distanza di Hamming non nulla, questa si riferisce ai possibili valori di distanza ottenibili confrontando Iris Code diversi dello stesso soggetto; il valor medio di tale distribuzione sarà chiaramente minore di quello che caratterizza la distribuzione inter-classe.

Nel caso in cui la separazione tra le due distribuzioni sia netta, è possibile scegliere una distanza di soglia che permetta di effettuare la decisione a valle del confronto tra i due template biometrici. Se la distanza di Hamming tra due Iris Code è inferiore alla distanza di soglia, i due modelli biometrici oggetto del confronto, vengono considerati come appartenenti allo stesso soggetto. Al contrario, se la distanza di Hamming è maggiore della distanza di soglia, i due template vengono considerati come appartenenti a soggetti diversi.

La bontà di un sistema di riconoscimento dell'iride è legata alla sua capacità di realizzare una netta separazione tra la distribuzione delle distanze di Hamming intra-classe e inter-classe; generalmente le due distribuzioni risultano parzialmente sovrapposte. Le prestazioni del sistema vengono misurate in termini di *False Accept Rate* (*FAR*), che misura la probabilità che un individuo venga identificato come un altro individuo, e *False Reject Rate* (*FRR*), che misura la probabilità che un individuo già registrato non venga riconosciuto.

I valori di FRR e FAR dipendono strettamente dall'entità della sovrapposizione tra le distribuzioni delle distanze di Hamming intra-classe e inter-classe. FAR è definito come:

$$FAR = \frac{\int_0^{d_t} P_{inter}(x)dx}{\int_0^1 P_{inter}(x)dx}$$

mentre FRR si calcola con:

$$FRR = \frac{\int_{d_t}^1 P_{intra}(x) dx}{\int_0^1 P_{intra}(x) dx}$$

dove d_t rappresenta la distanza di soglia, calcolata in modo tale da avere equilibrio tra false accettazioni e falsi rifiuti.

Capitolo 3

La biometria dell'occhio umano

3.1 Anatomia e fisiologia

L'occhio umano è l'organo di senso principale dell'apparato visivo che ha il compito di ricavare le informazioni sull'ambiente circostante attraverso la luce.

Esso rifrange la luce presente nell'ambiente, ne regola l'intensità attraverso un diaframma chiamato iride, la focalizza mediante un sistema di lenti regolabile per formare un'immagine e trasforma questa immagine in una serie di segnali elettrici che attraverso il nervo ottico vengono inviati al cervello dove vengono elaborati e interpretati.

Nell'uomo l'occhio ha consistenza dura ed elastica ed è tenuto in posto, oltre che dai muscoli, da fasce, nervi e vasi che in esso penetrano.

Il bulbo oculare può essere ben approssimato con una sfera e presenta nella parte anteriore, proiettata verso l'esterno, una calotta quasi sferica con raggio di curvatura maggiore di quello bulbare.

Il globo oculare, la cui struttura è rappresentata in figura 3.1, è costituito da tre membrane, ognuna delle quali svolge funzioni differenti [2] [24].

La prima membrana, o tunica esterna, forma il guscio oculare ed è costituita dalla sclera e dalla cornea, due parti diverse sia strutturalmente che fisicamente.

La sclera è una membrana fibrosa dura, opaca e di colore bianco, e costituisce il 93% della superficie del bulbo oculare.

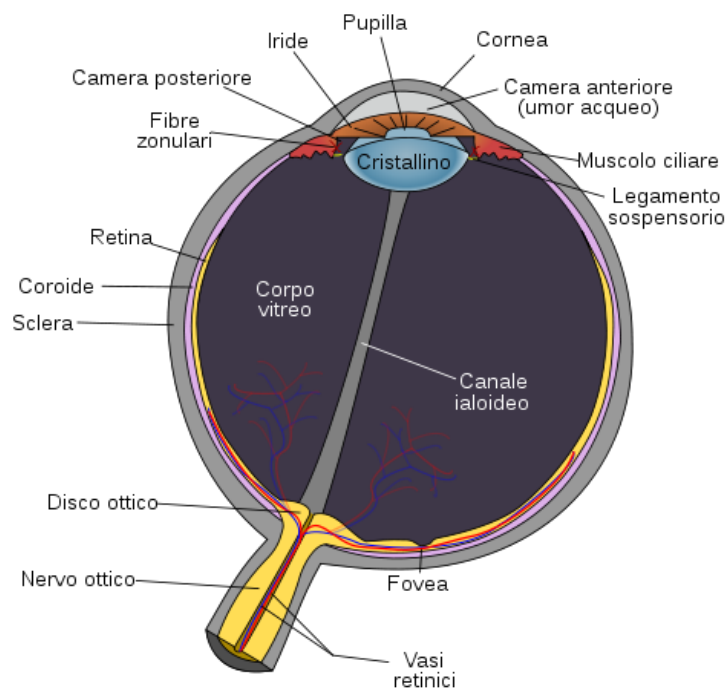


Figura 3.1: La struttura dell'occhio umano.

Questa membrana ha una funzione strutturale e protettiva, mantiene la forma del bulbo oculare proteggendo al contempo le strutture in esso contenute, consente l'inserzione dei muscoli cosiddetti estrinseci (che controllano il movimento degli occhi) e prosegue anteriormente con la cornea.

La sclera è formata a sua volta da due strati, quello più esterno detto episclera, ricco di tessuto connettivo e vasi sanguigni, e lo strato più interno formato da un tessuto connettivo lasso.

La cornea è una calotta quasi sferica con spessore variabile il cui raggio di curvatura è maggiore di quello sclerotico, costituisce la parte frontale della tunica esterna ed è formata da un tessuto trasparente, sottile e delicato il cui indice di rifrazione è pari a circa 1.376.

Essa ha il compito di proteggere gli strati più interni e di rifrangere le luce proveniente dall'esterno.

La seconda membrana, o tunica vascolosa, contiene la coroide, l'iride e il

corpo ciliare.

La coroide, disposta al di sotto della sclera, è ricchissima di vasi sanguigni che servono a nutrire la membrana oculare più interna, la retina. E' costituita inoltre da fibre connettivali e da cellule ripiene di pigmento nerastro che contribuiscono a mantenere la necessaria oscurità nella camera oscura del bulbo oculare.

L'iride è un disco colorato, visibile attraverso la cornea, formato da materiale opaco che al centro presenta un foro nero, la pupilla, sottile diaframma tra cornea e cristallino. Il suo diametro è di circa 11.5 mm, il suo spessore può variare da 0.5 mm a 1 mm mentre il suo colore è determinato dalla quantità di cellule pigmentari presenti nella sua struttura.

L'iride divide la camera anteriore, zona compresa tra cornea e iride, dalla camera posteriore, sita tra iride e cristallino.

Essa si comporta come otturatore di una macchina fotografica dove la pupilla funziona da apertura. Questa regola la quantità di luce che incide sulla retina; quando la quantità di luce che entra nell'occhio diminuisce, il muscolo dilatatore dell'iride, che agisce radialmente, spinge l'iride dal centro verso l'esterno causando la dilatazione della pupilla e permettendo così che una maggior quantità di luce raggiunga la retina. Al contrario, quando troppa luce entra nell'occhio, il muscolo sfinterico che circonda la pupilla spinge l'iride verso il centro, provocando il restringimento della pupilla e permettendo che una minor quantità di luce raggiunga la retina.

Il diametro della pupilla può variare da un minimo di circa 2 mm, in caso di massima illuminazione, ad un massimo di circa 8 mm, in caso di scarsa illuminazione.

Il corpo ciliare inizia in corrispondenza della giunzione sclerocorneale, la sua porzione anteriore si attacca alla parte periferica dell'iride, e posteriormente si estende sino all'ora serrata.

La parte principale del corpo ciliare è costituita da un anello muscolare, il muscolo ciliare, che si proietta verso l'interno dell'occhio, ed è rivestito da un epitelio ripiegato su se stesso a formare delle creste, definite processi ciliari, sulle quali si inseriscono i legamenti sospensori (o fibre zonulari) del cristallino.

Tra la seconda e la terza membrana si trovano il cristallino e la zonula, organi

strettamente collegati tra loro.

Il cristallino ha uno spessore di circa 3.5 mm e un diametro di circa 10 mm; è costituito da una sostanza trasparente e molto elastica, è composta da tre strati che sono rispettivamente, dall'esterno verso l'interno, la capsula, la zona corticale e il nucleo.

Queste tre parti hanno diverso indice di rifrazione: per la capsula l'indice di rifrazione vale 1.376, per la zona corticale 1.375 e per il nucleo 1.406.

Il cristallino, nel suo complesso, ha la forma di una lente biconvessa con curvatura maggiore nella faccia posteriore. La curvatura delle facce del cristallino varia in funzione della distanza dell'oggetto osservato; tale fenomeno è chiamato processo di accomodazione.

La zonula è costituita da una sostanza fibrosa e collega il muscolo ciliare con il cristallino.

La terza membrana, quella più interna, contiene la retina. Oltre ad avere una struttura a strati, la retina contiene al suo interno dei fotorecettori, cellule sensibili alle radiazioni luminose.

Tra le cellule che la compongono sono presenti i *coni* e i *bastoncelli*; i coni operano in condizioni di luce piena e sono responsabili della visione a colori mentre i bastoncelli sono sensibili alle basse intensità di luce.

3.1.1 L'iride

L'iride è un diaframma circolare, posto dietro la cornea ed anteriormente al cristallino; al centro dell'iride si trova un'apertura circolare, la pupilla; quest'ultima non sempre ha una posizione perfettamente centrale, normalmente è circolare, ma può anche essere ellittica, variamente orientata.

La funzione dell'iride è quella di controllare la quantità di luce che passa attraverso la pupilla e colpisce la retina. Infatti all'interno dell'iride vi sono due muscoli lisci, lo sfintere e il muscolo dilatatore, che permettono alla pupilla di dilatarsi e di restringersi, adattandosi alla luce.

Il diametro medio dell'iride è di 11.5 mm e le dimensioni della pupilla possono variare dal 10% all'80% del diametro dell'iride stessa.

La faccia anteriore dell'iride, visibile attraverso la cornea, presenta una colo-

razione che varia molto a seconda dei soggetti. Quest'ultima è determinata principalmente da due fattori: la pigmentazione del suo strato profondo, costituita dalla parte iridea della retina, ed il pigmento che può esistere negli strati più superficiali.

In particolare l'iride risulta formata da tre strati di tessuto sovrapposto, che dalla faccia anteriore alla posteriore sono: l'endotelio, lo stroma e l'epitelio; l'endotelio è la parte anteriore dell'iride, quella visibile e colorata, lo stroma è la parte intermedia ed è costituita da tessuto connettivo fortemente vascolarizzato ed innervato contenente il muscolo che consente alla pupilla di restringersi e celle di pigmento, mentre l'epitelio, che sostanzialmente è una continuazione della retina, è composto da due foglietti colorati, che in corrispondenza della pupilla formano il margine pupillare.

La tessitura dell'iride, così come appare alla vista, è dunque direttamente dipendente da questa struttura multistrato.

La colorazione che assume l'iride può essere chiara (dal blu al verde) o bruna (dal marrone al nero) in funzione sia della quantità di pigmento sia dipendente da fenomeni ottici di riflessione e di diffrazione della luce nello stroma. A causa della sua composizione, infatti, l'iride diffonde la luce che la colpisce, ovvero la rinvia in tutte le direzioni. Le lunghezze d'onda che vengono diffuse in misura maggiore sono le più corte, quelle che corrispondono alla percezione del blu.

L'iride però contiene anche melanina, un pigmento che assorbe varie lunghezze d'onda. Quando la melanina è abbondante la maggior parte della luce viene assorbita, facendo apparire l'iride marrone scuro. Una quantità inferiore di melanina rende gli occhi nocciola o verdi, e una quantità ancor più esigua rende visibile il colore azzurro.

La parte visibile dell'iride viene divisa in due zone che spesso differiscono per il colore: una zona ciliare esterna e una zona pupillare interna separate dal collaretto, o siepe, che ha una struttura a zig zag (Fig. 3.2).

La formazione dell'iride comincia durante il terzo mese di vita dell'embrione, e, insieme alla pigmentazione, è completata entro l'ottavo mese. Lo sviluppo completo si ha entro l'anno e i tratti così definiti rimangono stabili per tutta la vita.

La formazione della tessitura dell'iride è un processo altamente casuale e

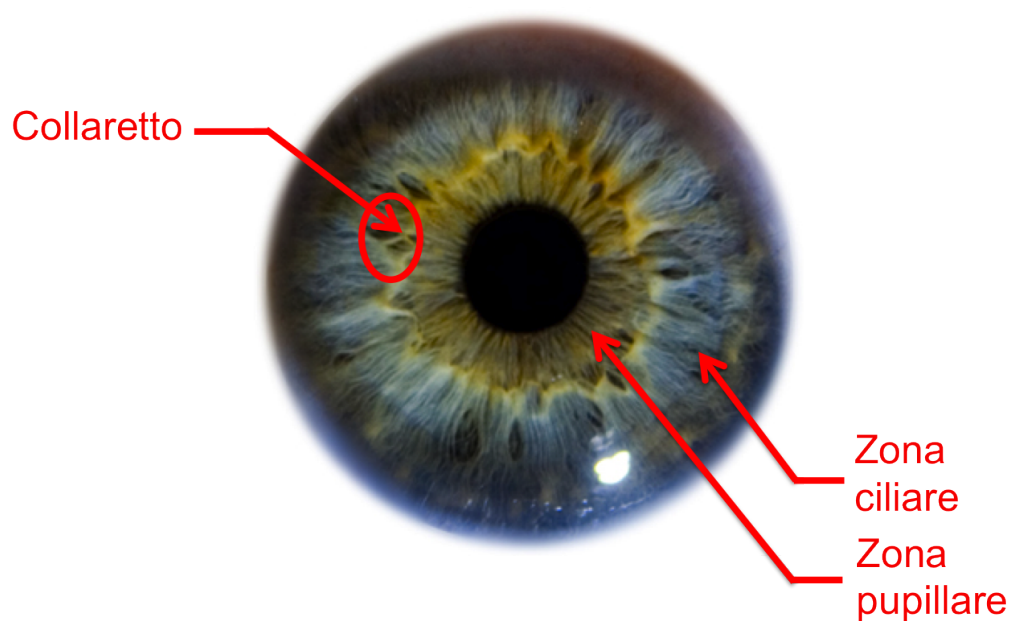


Figura 3.2: La struttura dell'iride.

non dipendente da fattori genetici, l'unica caratteristica dell'iride che è geneticamente dipendente è la sua pigmentazione. A causa di questo gli occhi di uno stesso individuo possiedono dei motivi nella tessitura dell'iride completamente indipendenti, così come lo sono quelli degli occhi di due gemelli omozigoti.

3.1.2 La cornea

La cornea è la parte frontale e trasparente dell'occhio che protegge iride, pupilla e camera anteriore.

Insieme al cristallino, la cornea rifrange la luce all'interno dell'occhio; da essa dipende il 65% del potere di rifrazione che caratterizza il sistema di lenti contenuto nell'occhio umano.

La cornea svolge principalmente tre funzioni:

1. rifrange i raggi di luce incidente sulla retina, consentendo la focalizzazione di un oggetto posto a qualsiasi distanza;

2. protegge gli strati più interni, iride e pupilla, senza comprometterne le caratteristiche ottiche;
3. trasmette la luce con minima distorsione, dispersione e assorbimento.

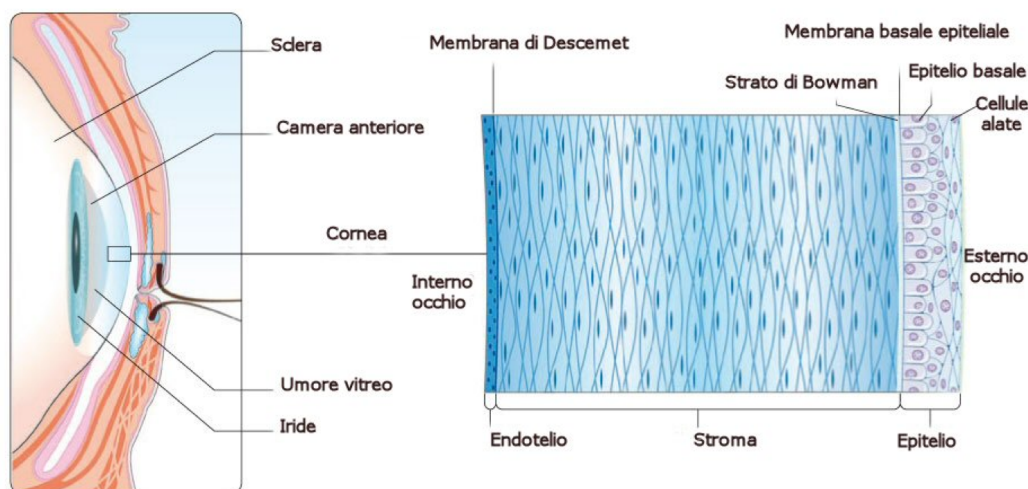


Figura 3.3: Composizione della cornea.

La superficie anteriore, di forma ellissoidale, ha un'estensione alquanto minore di quella posteriore ed è meno incurvata, avendo un raggio di curvatura maggiore.

Si congiunge al bulbo oculare attraverso la congiuntiva bulbare, che è applicata sulla parte anteriore della sclera, e si continua senza limiti netti sulla superficie anteriore della cornea col suo epitelio, che diventa parte integrante della cornea stessa.

La superficie posteriore è regolarmente circolare, più estesa, più fortemente e più regolarmente incurvata della superficie anteriore.

La cornea è costituita da diversi strati sovrapposti (Fig. 3.3) che, dalla superficie anteriore a quella posteriore, sono:

- epitelio: costituisce circa il 10% dello spessore della cornea ($50 \mu\text{m}$) e a sua volta contiene diversi strati cellulari che proteggono la superficie oculare dall'abrasione meccanica e formano una barriera permeabile;

- membrana di Bowmann: presenta un denso agglomerato di fibrille di collagene poste in una matrice simile a quella della sostanza propria (stroma), ed è spessa circa $12 \mu\text{m}$;
- stroma: è spesso circa $550 \mu\text{m}$ e costituisce la maggior parte della cornea. E' uno strato compatto e trasparente, composto di 200-250 lamelle sequenziali, ognuna formata da fibrille sottili e parallele di collagene;
- membrana di Descemet: membrana sottile e apparentemente omogenea, è considerata come la membrana basale dell'endotelio. E' formata da un reticolo di fibrille di collagene, che le forniscono elasticità, immerse in una matrice extracellulare amorfa;
- endotelio: l'endotelio corneale tappezza tutte le pareti della camera anteriore. E' formato da una fila di cellule regolarmente appoggiate alla faccia profonda della lamina elastica posteriore, larghe ed appiattite.

3.2 Modellizzazione

Ad oggi la tecnologia oftalmica permette lo studio e la manipolazione delle componenti dell'occhio, cornea e cristallino, assicurando un alto livello di precisione. Questa tecnologia si propone di introdurre un maggior livello di dettaglio nello studio delle caratteristiche dell'occhio umano in modo da poter migliorare l'efficacia dei metodi utilizzati per la correzione delle aberrazioni ottiche, partendo dallo studio di modelli particolareggiati dell'occhio umano.

L'obiettivo del progetto di tesi consiste nel correggere le distorsioni presenti nell'immagine acquisita e introdotte dagli strati superficiali che proteggono l'iride, cornea e umore acqueo.

Data la complicata struttura dell'occhio umano, sia dal punto di vista dell'anatomia che dal punto di vista ottico, la creazione di un modello completo e accurato dell'occhio umano, in ogni sua parte, risulta oltremodo complicato. Dovendo valutare il comportamento refrattivo di cornea e umore acqueo, si può fare riferimento a dei modelli semplificati utilizzati in oftalmologia per lo studio delle proprietà ottiche dell'occhio umano, dove si considerano in

particolar modo i valori degli indici di rifrazione che caratterizzano le discontinuità.

In letteratura esistono diversi modelli semplificati per l'occhio umano che si differenziano l'uno dall'altro in base al numero di strati considerati, ai valori di indici di rifrazione associati ai vari strati, e ai parametri geometrici utilizzati per la costruzione.

Tra i modelli ben noti si trovano quelli di *Helmholtz-Laurance* (1909), *Gullstrand* (1911), *Emsley* (1946), *Schwiegerling* (1995) e *Liou-Brennan* (1997) [6].

In figura 3.4 sono rappresentati i primi 4 modelli. Il primo di questi modelli contiene tutte le superfici ottiche note nella biologia dell'occhio umano e, sebbene contenga degli indici di rifrazione non necessariamente corrispondenti a quelli reali misurati, possiede proprietà che hanno stretta somiglianza con quelle possedute dall'occhio umano.

Nel modello di *Gullstrand*, che introduce delle migliorie rispetto al modello precedente, vengono considerate, oltre a una rappresentazione semplificata della cornea, anche l'umor acqueo e l'umor vitreo. Tale modello è particolarmente adatto per il dimensionamento del cristallino artificiale (*IOL*), in quanto contiene anche le superfici anteriori e posteriori del cristallino.

Uno dei modelli più semplici è quello di *Emsley* all'interno del quale viene considerata un'unica interfaccia refrattiva. Grazie alla sua semplicità tale modello viene usato, per scopi didattici, in optometria e oftalmologia.

Il miglioramento delle tecniche di topografia corneale hanno reso possibile l'aumento del livello di dettaglio dei modelli che, successivamente, sono stati introdotti. Nel 1995 *Schwiegerling* propose un modello contenente quattro superfici refrattive non sferiche, modello decisamente più evoluto dei precedenti.

Il modello di *Liou-Brennan* (Fig. 3.5) è quello che più si avvicina alla realtà, dal punto di vista anatomico, ottico e biologico in quanto, oltre a introdurre degli strati aggiuntivi, associa ai vari strati, valori ottenuti attraverso media di misurazioni empiriche.

Sempre in letteratura [6] si trova che, dopo un'attento confronto tra i modelli disponibili, mentre tutti offrono buona qualità dal punto di vista ottico, il modello sintetico di *Liou-Brennan* è quello che rappresenta più fedelmente

Modello	Layout	Parametri
Helmholtz-Laurance (1909)		$n_1 = 1.333$ $n_2 = 1.45$ $n_3 = 1.333$
Gullstrand (1911)		$n_1 = 1.336$ $n_2 = 1.413$ $n_3 = 1.336$
Emsley (1946)		$n_1 = 1.333$
Schwiegerling (1995)		$n_1 = 1.3771$ $n_2 = 1.3374$ $n_3 = 1.42$ $n_4 = 1.336$

Figura 3.4: Modelli semplificati delle discontinuità dell'occhio umano

l'occhio umano dal punto di vista biologico (e ottico). Per quanto riguarda la geometria del modello considerato, i cui parametri sono stati tratti da uno studio condotto da *A. Lefohn, B. Budge, and P. Shirley* [16], abbiamo considerato le seguenti approssimazioni:

- la cornea, nella realtà un menisco, viene modellata mediante una calotta sferica avente due diversi raggi di curvatura, uno posteriore ed uno anteriore;

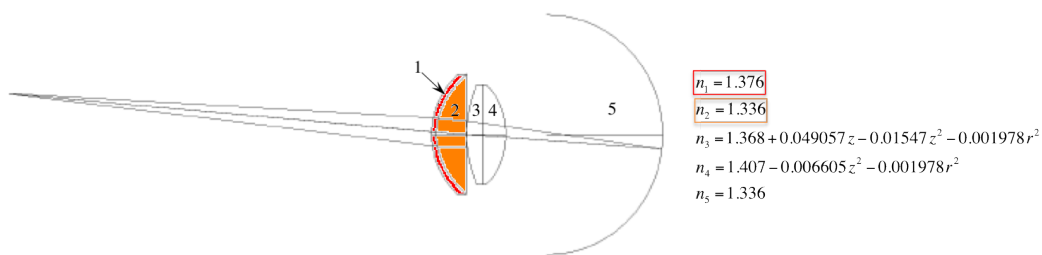


Figura 3.5: Modello semplificato di Liou - Brennan

- l'iride, nella realtà con spessore variabile, viene assunto piano e avente spessore costante.

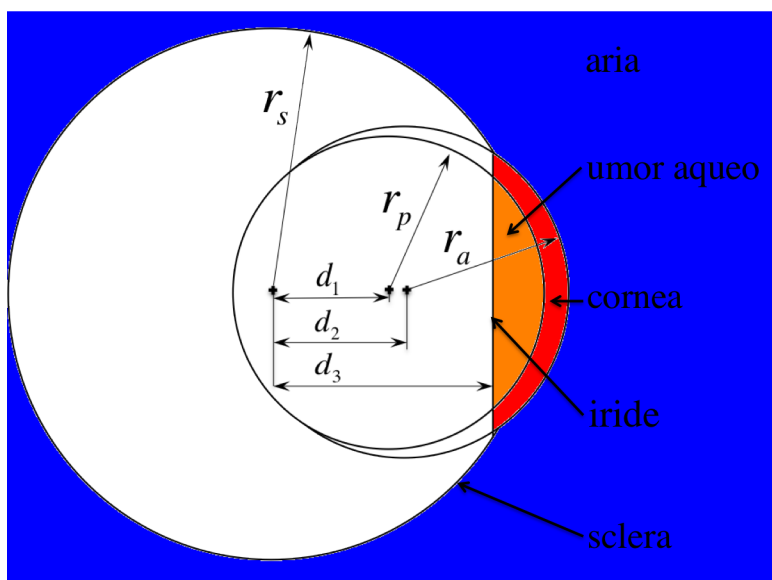


Figura 3.6: Geometria del modello considerato

Di seguito vengono riportati i valori di indici di rifrazione e i parametri geometrici considerati per la costruzione del modello:

- cornea
 - indice di rifrazione $n_c = 1.376$
 - raggio di curvatura corneale anteriore $r_a = 7.2$ mm
 - distanza tra centro sclera e centro curvatura corneale anteriore $d_2 = 5.62$ mm

- raggio di curvatura corneale posteriore $r_p = 6.8$ mm
- distanza tra centro sclera e centro curvatura corneale posteriore $d_1 = 5.45$ mm
- spessore corneale minimo $s_{min} = 0.5$ mm
- spessore corneale periferico $s_p = 0.65$ mm

- umore acqueo
 - indice di rifrazione $n_u = 1.336$

- sclera
 - raggio $r_s = 11.5$ mm

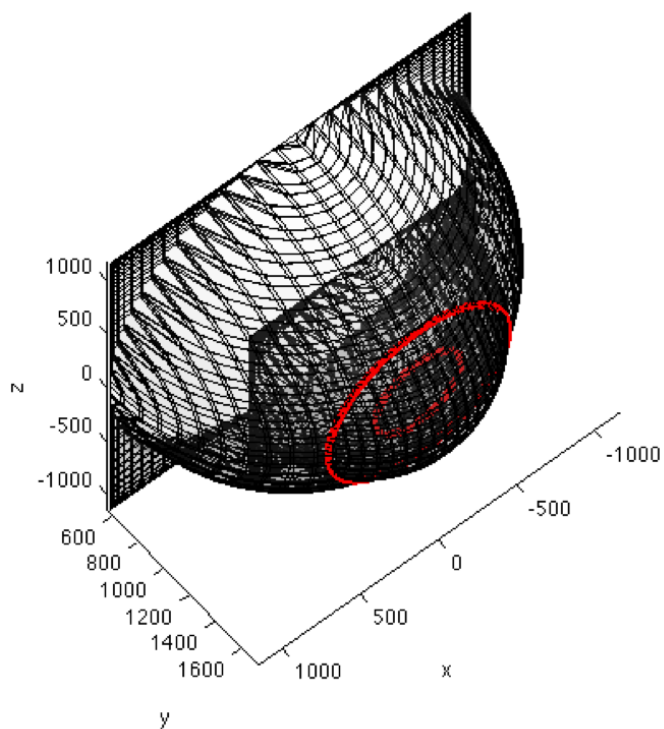
- iride
 - raggio $r_i = 5.75$ mm
 - distanza tra centro sclera e centro iride $d_3 = 9.95$ mm

- pupilla
 - raggio medio $r_p = 2.75$ mm

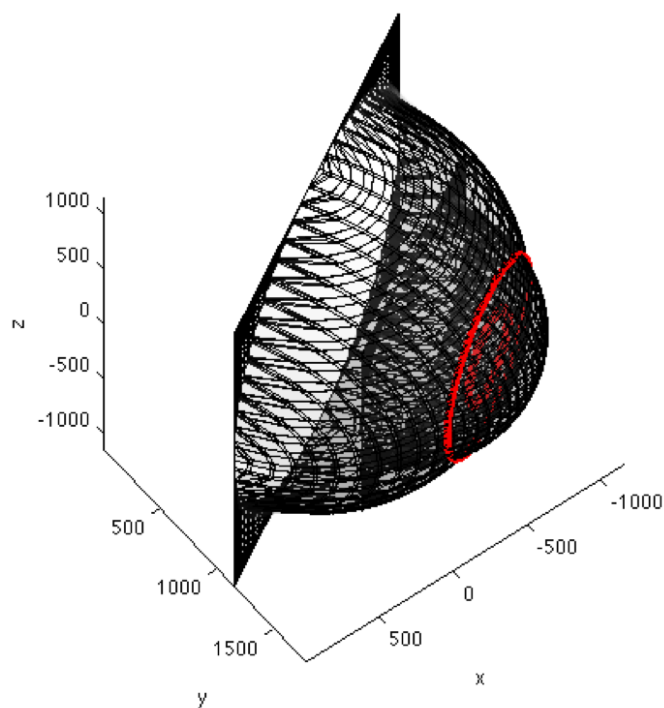
In relazione ai parametri sopracitati abbiamo riprodotto in ambiente MATLAB[®] la geometria 3D di un occhio umano semplificato, includendo sclera, cornea, iride e pupilla (Fig. 3.7).

Ogni punto del modello geometrico è stato poi caratterizzato dal punto di vista ottico, attraverso una matrice a tre dimensioni $n(\vec{x})$ contenente per ogni punto del modello il valore di indice di rifrazione corrispondente (Fig. 3.8).

Per modellare la rotazione dello sguardo rispetto alle coordinate della camera, il modello così ottenuto verrà ruotato attorno al centro della sclera (centro di rotazione dello sguardo) di un angolo pari a quello di vista ϕ_v , in accordo con la modalità attraverso la quale è stata acquisita l'immagine da correggere.



(a) Angolo di vista: $\phi_v = 0^\circ$.



(b) Angolo di vista: $\phi_v = 30^\circ$.

Figura 3.7: Geometria del modello 3D costruito.

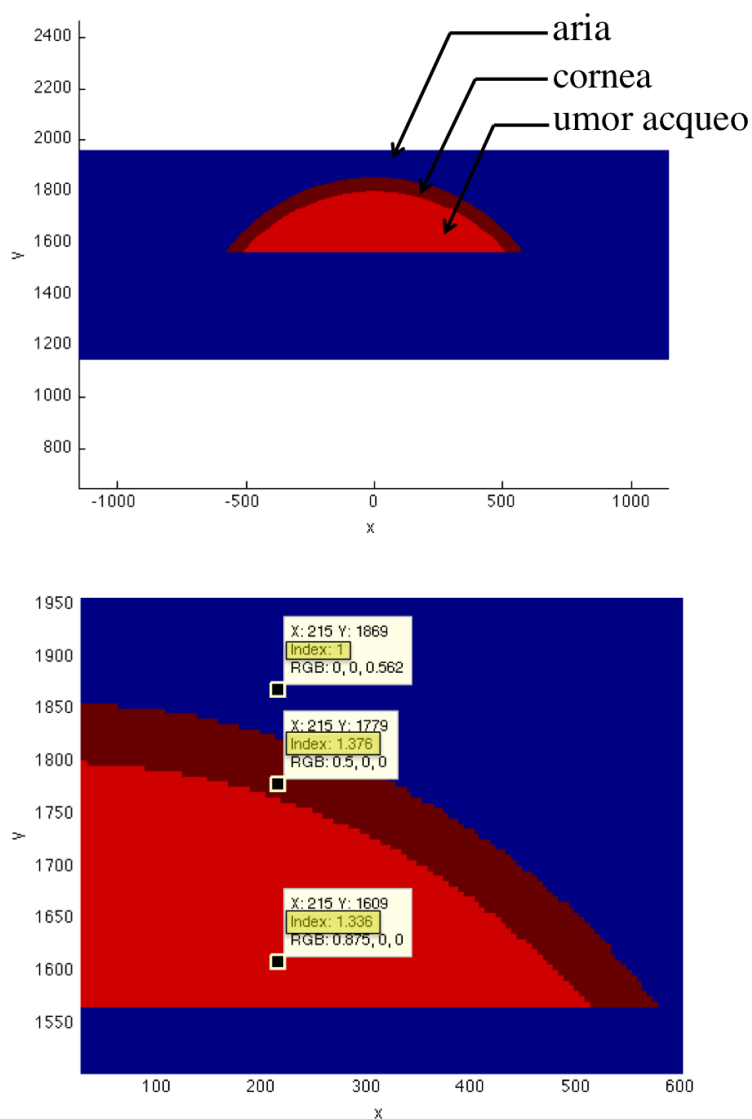


Figura 3.8: Sezione a metà altezza della mappa degli indici di rifrazione del modello considerato.

Partendo dalla parametrizzazione del modello in indici di rifrazione, abbiamo ricavato i relativi modelli di velocità e lentezza, attraverso i legami:

$$c(\vec{x}) = \frac{c_0}{n(\vec{x})}, \quad s(\vec{x}) = \frac{1}{c(\vec{x})}$$

dove c_0 indica la velocità della luce nel vuoto e $n(\vec{x})$ rappresenta il valore dell'indice di rifrazione in un determinato punto dello spazio 3D del modello individuato da \vec{x} .

Capitolo 4

Algoritmo di correzione

Ad oggi i sistemi biometrici per il riconoscimento dell'iride sono in grado di offrire alta affidabilità purché le immagini da elaborare vengano acquisite in modo ortogonale e presentino elevata risoluzione.

Fissata la risoluzione, il disallineamento tra camera e bulbo oculare provoca la distorsione dell'immagine acquisita.

Ciò fa sì che le prestazioni del sistema di riconoscimento diminuiscano drasticamente ed in alcuni casi siano tali da rendere impossibile la corretta identificazione del soggetto.

Tuttavia, per aumentare le potenzialità del sistema senza introdurre variazioni sostanziali nell'algoritmo di riconoscimento, è necessario poter disporre di un metodo che consenta di determinare delle correzioni da applicare alle immagini per compensare le distorsioni introdotte in fase di acquisizione.

Possiamo distinguere due tipologie di distorsioni presenti nell'immagine acquisita [19] [8]:

- distorsioni intrinseche: l'immagine acquisita, anche in condizioni ideali, contiene al suo interno l'effetto distorcente introdotto dalle superfici più esterne che proteggono l'iride. Le caratteristiche ottiche (indici di rifrazione) e la morfologia di tali superfici (curvatura) permettono di semplificarne il comportamento complessivo associandolo a quello di una lente convergente; i raggi di luce provenienti dall'esterno, per effetto della prima discontinuità tra cornea e aria, quella da cui dipende circa il 65% del potere refrattivo dell'occhio umano, convergono per

poi incidere all'altezza dell'iride e della pupilla. L'iride che compare nell'immagine acquisita, risulta quindi intrinsecamente compresso in maniera non lineare per effetto delle discontinuità che caratterizzano gli strati superficiali, quelli che proteggono l'iride.

- distorsioni geometriche: sono presenti all'interno dell'immagine quando l'iride da fotografare non giace esattamente sul piano ortogonale al dispositivo di acquisizione. In questo caso, essendo l'immagine la proiezione della scena sul piano frontale alla camera, l'iride acquisita non risulterà più approssimativamente circolare bensì di forma ellittica. Si può pensare ad esempio a uno scenario di acquisizione in cui camera e iride si trovano alla stessa altezza ma non sono allineati verticalmente: l'immagine acquisita, oltre a contenere le distorsioni intrinseche introdotte dalla cornea, risulterà compressa orizzontalmente per effetto dell'acquisizione non ortogonale.

Appare chiaro dunque che, in assenza di cooperazione da parte del soggetto da identificare, l'immagine prodotta in fase di acquisizione risulterà distorta e quindi non costituirà un valido dato d'ingresso per l'algoritmo di riconoscimento.

L'obiettivo del nostro progetto è proprio quello di determinare le correzioni da applicare alle immagini per compensare le distorsioni introdotte nell'immagine acquisita in modo da rendere possibile il riconoscimento anche nel caso in cui questo debba essere effettuato partendo da un'immagine acquisita da una vista non ortogonale.

Le correzioni vengono determinate e applicate sia alle immagini frontali che costituiscono il database, sia alle immagini acquisite ad angolazione nota.

Tutto ciò è stato fatto riproducendo in ambiente MATLAB[®] le due diverse situazioni di acquisizione, ricavando le coordinate dei pixel da ricondurre a quelle dei pixel dell'immagine acquisita e riposizionando i valori di intensità ottenuti mediante interpolazione su un supporto d'uscita regolare, supporto dell'immagine a valle delle correzioni.

L'uscita del nostro algoritmo rappresenta, nel caso di immagine frontale, un'immagine in cui vengono rimossi gli effetti di distorsione introdotti da cornea e umor acqueo e, nel caso di immagine off-angle, un'immagine in

cui vengono compensate sia le distorsioni di forma che quelle dovute alle disomogeneità dell'occhio.

4.1 Database WVU

Le immagini utilizzate per lo sviluppo e i test del nostro algoritmo, sono tratte da una versione ridotta di un database appositamente prodotto dalla West Virginia University per studiare il comportamento dell'algoritmo di riconoscimento dell'iride nel caso in cui questo venga fatto operare su immagini che contengono iridi non centrali.

Il database completo contiene 584 immagini acquisite in ambiente indoor, con illuminazione tipo "ufficio", a una distanza di circa 4 inch (101.6 mm), utilizzando una macchina fotografica monocromatica [22] [20]. Le immagini del database sono perciò in scala di grigio.

La particolarità del database risiede nel fatto che, per ogni soggetto, sono presenti più immagini ottenute considerando diverse angolazioni di sguardo. In particolare, per ogni soggetto si hanno a disposizione 8 immagini di cui 4 per l'occhio destro e 4 per l'occhio sinistro.

Ogni occhio viene fotografato 4 volte frontalmente, in 2 casi il soggetto guarda l'obiettivo della camera mentre negli altri due casi osserva un punto posto a 15° e 30° in azimuth rispetto all'obiettivo, in modo che le iridi contenute nelle immagini così acquisite risultino non centrali ma ruotate di un'angolazione nota. In figura 4.1 viene riportata la sequenza di immagini acquisite per il singolo occhio.

4.2 Segmentazione

Il primo passo dell'algoritmo consiste nell'estrazione della regione dell'immagine acquisita in cui è contenuta l'iride, zona alla quale verranno applicate le correzioni a valle del calcolo.

L'operazione di segmentazione, nel contesto di un algoritmo di riconoscimento dell'iride, serve per localizzare iride e pupilla all'interno dell'immagine, successivamente elaborati attraverso normalizzazione e estrazione di feature

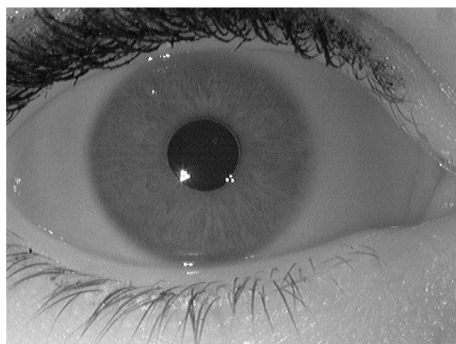
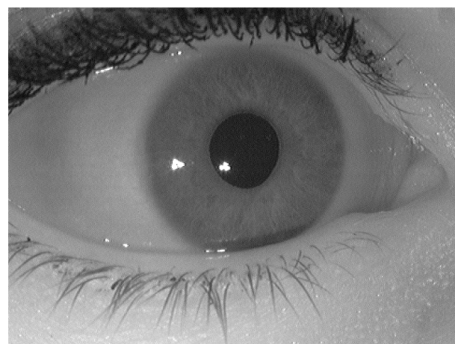
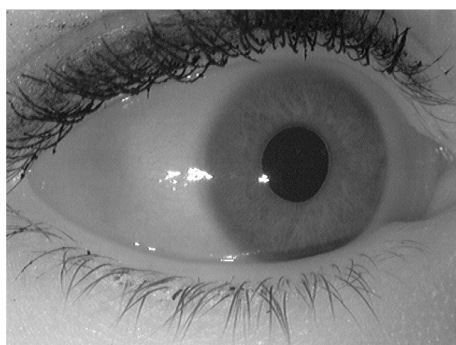
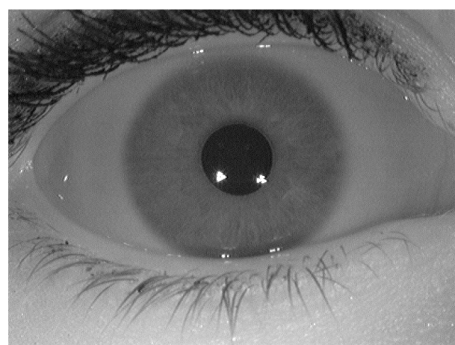
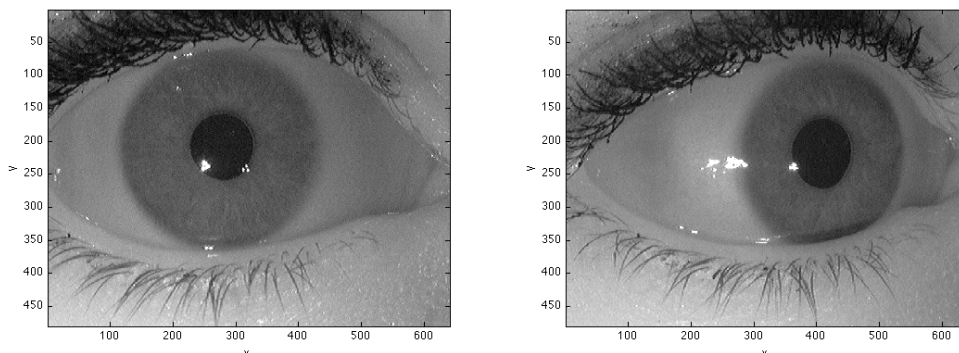
(a) *Prima acquisizione a 0°.*(b) *Acquisizione a 15°.*(c) *Acquisizione a 30°.*(d) *Seconda acquisizione a 0°.*

Figura 4.1: Immagini tratte dal database WVU.

per l'estrazione del template biometrico.

Dato che non si ha alcuna informazione sulla focale del dispositivo di acquisizione, l'operazione di segmentazione nel nostro algoritmo, oltre che a consentire l'estrazione della *ROI* (*Region Of Image*) a cui applicare le correzioni, serve a ricavare le coordinate del contorno iride-sclera in modo che divenga possibile legare dal punto di vista dimensionale l'iride nel modello creato con l'iride presente nell'immagine acquisita. Ciò è necessario per valutare abbastanza fedelmente l'effetto distorto che caratterizza la situazione reale d'acquisizione.

Tale operazione richiede però considerazioni diverse a seconda che l'immagi-



(a) Immagine acquisita frontalmente. (b) Immagine acquisita da un'angolazione di 30° .

Figura 4.2: Effetto distorcente ottenuto nel caso di acquisizione off-angle.

ne considerata provenga da acquisizione frontale o da acquisizione off-angle.

Infatti, mentre nelle immagini acquisite frontalmente iride e pupilla sono ben approssimabili con delle circonferenze, nelle immagini acquisite non frontalmente iride e pupilla si distorcono divenendo di forma pressoché ellittica. In figura 4.2 sono rappresentate due immagini di occhio dello stesso individuo, acquisite con angolazioni diverse.

Ciò accade perché nell'immagine sono presenti le proiezioni di iride e pupilla nel piano frontale.

Per segmentare le immagini con iridi centrali abbiamo utilizzato la trasformata di Hough, descritta nel Capitolo 2 (Fig. 4.3).

E' necessario tener presente che, al crescere del numero dei parametri, cresce rapidamente la complessità dell'algoritmo di Hough richiedendo, per il calcolo della soluzione, la ricerca in uno spazio di dimensione maggiore.

Come detto, nel caso di immagini acquisite non frontalmente, sia iride che pupilla possono essere ben approssimate con un ellisse, la cui rappresentazione parametrica è:

$$x = x_c + r_x \cos\theta$$

$$y = y_c + r_y \sin\theta$$

dove r_x e r_y rappresentano i semiassi dell'ellisse.

Lo spazio dei parametri, rispetto al caso di segmentazione circolare, è cre-

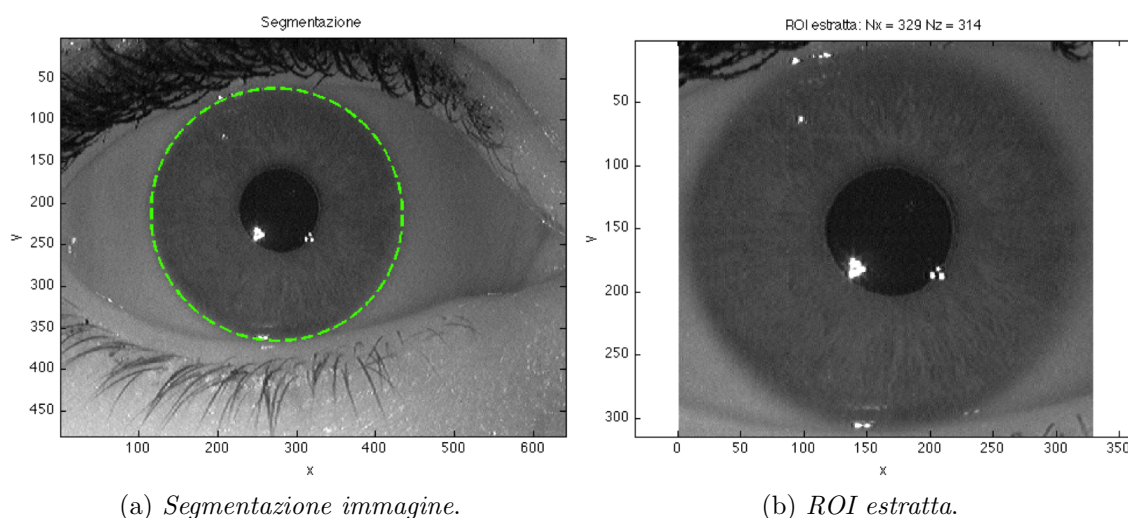
(a) *Segmentazione immagine.*(b) *ROI estratta.*

Figura 4.3: Estrazione della regione d'interesse circolare attraverso l'operazione di segmentazione.

sciuto di una dimensione; ciò rende sconveniente l'utilizzo della trasformata di Hough.

Per segmentare le immagini con iridi non centrali abbiamo allora implementato un'estensione dell'algoritmo già usato per la segmentazione delle immagini acquisite frontalmente (Fig. 4.4), che prevede:

1. trasformata di Hough: si ricercano le circonferenze con il maggior numero di punti in comune ai contorni iride-sclera, pupilla-iride;
2. creazione maschera ellittica: una volta calcolato l'offset tra i centri delle due circonferenze, si crea una nuova circonferenza simmetrica a quella ottenuta con la trasformata di Hough per il contorno iride-sclera, considerando come centro di simmetria il centro della pupilla, e si considera il contorno definito dall'intersezione tra le due circonferenze. Partendo da tale contorno si crea poi un'ellisse concentrica, scheletro della maschera, con semiassi ottenuti valutando altezza e larghezza del contorno che delimita la regione d'intersezione. La maschera ellittica si ottiene attraverso l'espansione dello scheletro nelle due direzioni, avendo cura di trascurare i settori prossimi alle zone rumorose (palpebre, ciglia, ecc.) non sempre presenti;

3. ricerca del contorno: si effettua la moltiplicazione tra la mappa dei contorni e la maschera binaria ottenuta, in modo che vengano esclusi i punti siti al di fuori della zona di ricerca. I punti selezionati vengono passati a un algoritmo di *ellipse fitting* presente in letteratura [9], che restituisce le coordinate dei punti del contorno iride-sclera;
4. estrazione della regione d'interesse: si effettua il *cropping* dell'immagine considerando la finestra che racchiude il contorno identificato.

4.3 Tracing

L'interazione della luce con la materia, nel nostro caso l'occhio umano, non è interpretabile secondo la teoria elettromagnetica ma si tratta in meccanica e ottica quantistica in cui il formalismo matematico è assai complicato, tanto da rendere questi modelli inutilizzabili per lo studio del processo di formazione dell'immagine.

Si ricorre allora all'ottica geometrica che fornisce un modello di luce approssimato basato sui raggi e che permette di esaminare piuttosto agilmente gli effetti delle disomogeneità dell'occhio umano, salti d'indice di rifrazione, sul campo incidente, luce.

Per determinare il percorso seguito dai raggi si sfrutta il metodo dell'iconale in tre dimensioni.

4.3.1 Il metodo dell'iconale

Considerando valida l'ipotesi di applicabilità dell'ottica geometrica, $\lambda \rightarrow 0$ (o $f \rightarrow \infty$), è possibile sfruttare l'equazione iconale per determinare le traiettorie dei raggi, partendo dalla distribuzione degli indici di rifrazione del mezzo entro il quale i raggi stessi si propagano [7].

Utilizzando questa tecnica siamo quindi in grado di determinare le traiettorie dei raggi che, emessi da un punto di sorgente, si propagano fino alle discontinuità che caratterizzano gli strati superficiali del bulbo oculare, dove vengono rifratti per poi incidere in corrispondenza di iride e pupilla.

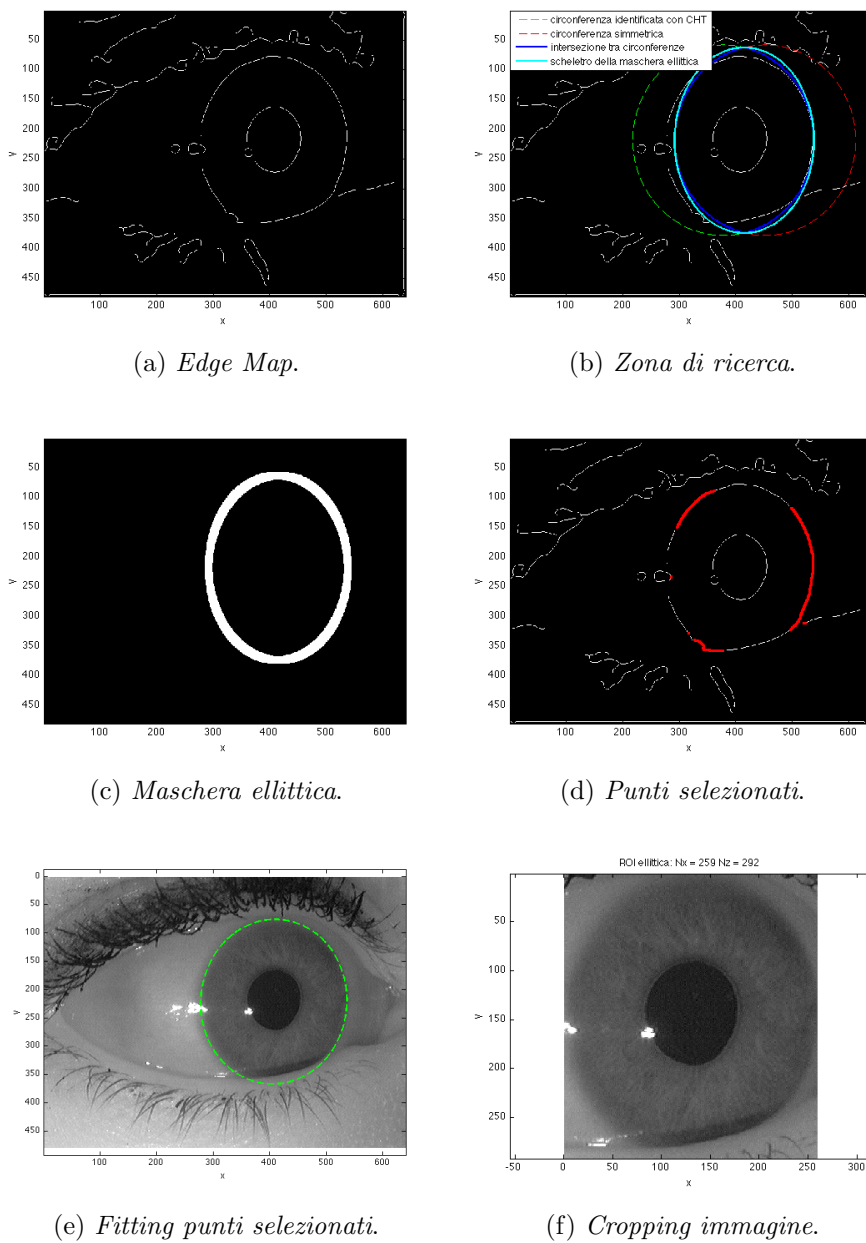


Figura 4.4: Estrazione della regione d'interesse ellittica attraverso l'operazione di segmentazione.

L'equazione iconale esprime lo stesso legame espresso dall'equazione d'onda: la lentezza con la quale il fronte d'onda si sfasa propagandosi all'interno di

un mezzo (*lentezza del campo*), coincide con la lentezza del mezzo stesso:

$$(\nabla T)^2 = \frac{1}{c(\vec{x})^2} \quad (4.1)$$

dove $T(\vec{x})$ è la funzione di fase dell'onda, ∇T indica la velocità con cui varia il fronte d'onda e $c(\vec{x})$ rappresenta la velocità del mezzo nel punto definito da \vec{x} .

Introducendo come variabile indipendente la distanza lungo la traiettoria del raggio, dl , si può scrivere che:

$$\frac{dT}{dl} = \frac{1}{c(\vec{x})} = s(\vec{x}) \quad (4.2)$$

dove $s(\vec{x})$ rappresenta la lentezza del mezzo.

La 4.2 indica che, muovendosi lungo la traiettoria del raggio, la derivata della funzione di fase varia in accordo con la lentezza del mezzo nel punto considerato, individuato da \vec{x} .

Per legare ora la tangente alla traiettoria del raggio, \vec{t} , con la lentezza del mezzo, $s(\vec{x})$, introduciamo il vettore lentezza, \vec{p} :

$$\vec{p} = p_x \vec{i}_x + p_y \vec{i}_y + p_z \vec{i}_z = \nabla T \quad (4.3)$$

il cui modulo coincide con la lentezza del mezzo:

$$p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = p^2 = \frac{1}{c^2} = s^2 \quad (4.4)$$

$$p = |\vec{p}| = \frac{1}{c} = s \quad (4.5)$$

Il vettore lentezza è legato in maniera diretta sia all'onda, in quanto ne definisce sia la direzione che la rapidità di direzione, che al mezzo, poiché il suo modulo coincide con la lentezza del mezzo.

Poiché il gradiente della funzione di fase, ∇T , misura la variazione del fronte d'onda lungo la direzione normale, la tangente alla traiettoria può essere espressa come:

$$\vec{t} = \frac{d\vec{x}}{dl} = \frac{\nabla T(\vec{x})}{s(\vec{x})} = \frac{\vec{p}}{s(\vec{x})} \quad (4.6)$$

dove $s(\vec{x})$ normalizza il modulo di \vec{t} , che essendo un versore deve avere modulo unitario.

La traiettoria non è ancora determinata perché è tutt'ora indeterminato il vettore lentezza. Per vincolarlo occorre esprimere la curvatura della traiettoria; questa coincide con la variazione della tangente alla traiettoria, lungo il percorso del raggio stesso:

$$\frac{d}{dl}(\nabla T) = \frac{d\vec{p}}{dl} = \nabla_s \quad (4.7)$$

Raggruppando le informazioni a disposizione su gradiente, tangente e curvatura della traiettoria si ottiene il sistema di equazioni differenziali:

$$\frac{dT}{dl} = s \quad (4.8)$$

$$\frac{dx}{dl} = \frac{p_x}{s}, \quad \frac{dy}{dl} = \frac{p_y}{s}, \quad \frac{dz}{dl} = \frac{p_z}{s}$$

$$\frac{dp_x}{dl} = \frac{ds}{dx}, \quad \frac{dp_y}{dl} = \frac{ds}{dy}, \quad \frac{dp_z}{dl} = \frac{ds}{dz}$$

che, insieme alle condizioni iniziali:

$$T(l = 0) = 0$$

$$\vec{x}(l = 0) = \vec{x}_0$$

$$\vec{p}(l = 0) = \vec{p}_0$$

e alla parametrizzazione del modello di lentezza:

$$s(x, y, z), \quad \frac{ds}{dx}, \quad \frac{ds}{dy}, \quad \frac{ds}{dz}$$

permette di determinare le traiettorie dei raggi all'interno del mezzo.

Le condizioni iniziali caratterizzano la posizione della sorgente, (\vec{x}_0) , e la direzione iniziale del raggio, (\vec{p}_0) ; questa dipende, oltre che dal valore di lentezza in corrispondenza della posizione di sorgente, anche dall'angolo di partenza. Detto θ l'angolo di elevazione e ϕ l'angolo di azimuth, si ha che:

$$p_{x_0} = s(\vec{x}_0) \sin(\theta) \cos(\phi)$$

$$p_{y_0} = s(\vec{x}_0) \sin(\theta) \sin(\phi)$$

$$p_{z_0} = s(\vec{x}_0) \cos(\theta)$$

Nel contesto di questo progetto questa tecnica è di fondamentale importanza dato che permette di studiare il percorso di un generico raggio che, partendo con direzione \vec{p}_0 da un punto di sorgente \vec{x}_0 , si propaga fino agli strati superficiali del bulbo oculare, dove viene rifratto per poi incidere sull'iride.

4.3.2 Implementazione del metodo dell'iconale

Il nucleo dell'algoritmo di correzione è basato sui risultati ottenuti applicando il metodo dell'iconale per il tracciamento dei raggi nel mezzo considerato, nel nostro caso il modello costruito per modellizzare l'occhio umano. Il metodo dell'iconale permette infatti di determinare la traiettoria per ogni raggio considerato e quindi di valutare come viene rifratto dalle superfici di discontinuità, fino all'iride.

A valle dell'operazione di tracciamento, memorizzando i punti d'incidenza dei vari raggi in corrispondenza dell'iride, otteniamo il reticolo di punti distorti per effetto delle discontinuità.

Operativamente occorre definire i modelli di velocità e lentezza del mezzo, e stabilire il numero e le angolazioni (direzioni di partenza) dei raggi da considerare.

Per definire i modelli di velocità, $c(\vec{x})$, e lentezza, $s(\vec{x})$, consideriamo:

$$c(\vec{x}) = \frac{c_0}{n(\vec{x})}, \quad s(\vec{x}) = \frac{1}{c(\vec{x})}$$

dove c_0 indica la velocità della luce nel vuoto e $n(\vec{x})$ rappresenta la distribuzione degli indici di rifrazione del modello costruito.

Per ricavare le informazioni associate alla variazione del modello di lentezza nello spazio, ne calcoliamo i gradienti $(s_x(\vec{x}), s_y(\vec{x}), s_z(\vec{x}))$. Dato lo spessore ridotto delle discontinuità, questi gradienti vengono poi filtrati passa basso; ciò viene fatto per renderli più visibili all'algoritmo di tracing, che altrimenti dovrebbe operare con incrementi spaziali estremamente piccoli, con i quali si otterrebbero tempi di simulazione molto lunghi.

Come verrà spiegato nella sezione dedicata alla descrizione dell'algoritmo di

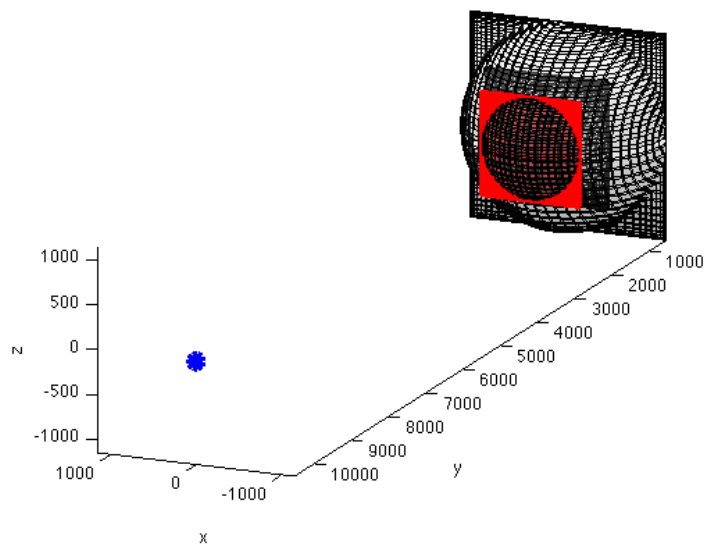
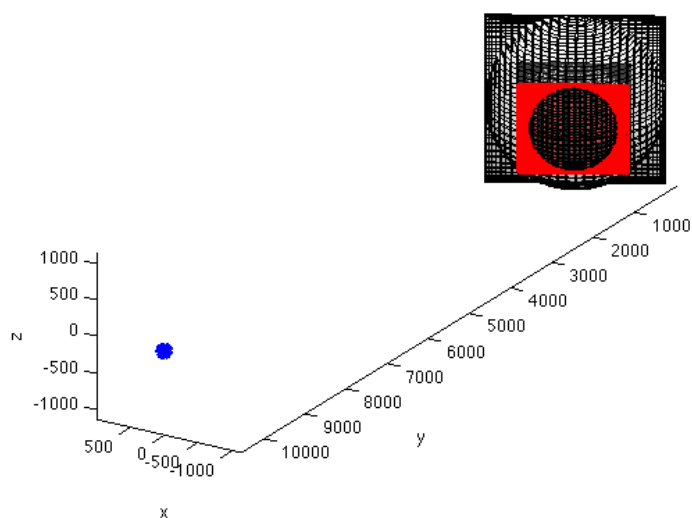
(a) *Acquisizione frontale.*(b) *Acquisizione off-angle.*

Figura 4.5: Reticolo di punti in corrispondenza dell'iride

correzione, per valutare le distorsioni introdotte attraverso rifrazione dagli strati superficiali dell'occhio umano, viene costruito un reticolo complanare all'iride contenente N_x punti nella direzione orizzontale e N_z punti nella

direzione verticale (Fig. 4.5). Per ognuno di questi punti, fissata la posizione della sorgente ($\vec{x}_s = \{x_s, y_s, z_s\}$), viene ricavata l'angolazione (θ_i, ϕ_j) della congiungente tra il punto del piano considerato e la sorgente.

In simulazione verranno quindi tracciati $N_x \cdot N_z$ raggi, ognuno con angolazione (θ_i, ϕ_j) , con $i = 1, \dots, N_z$ e $j = 1, \dots, N_x$.

Ora, per calcolare le traiettorie dei raggi da sorgente a iride (Fig. 4.6), si procede iterativamente e, per ogni raggio vengono svolte le seguenti operazioni:

1. calcolo dei valori iniziali delle componenti spaziali del vettore lentezza \vec{p} :

$$p_x(\vec{x}_s) = s(\vec{x}_s) \sin \theta_i \cos \phi_j$$

$$p_y(\vec{x}_s) = s(\vec{x}_s) \sin \theta_i \sin \phi_j$$

$$p_z(\vec{x}_s) = s(\vec{x}_s) \cos \theta_i$$

e costruzione del vettore delle condizioni iniziali:

$$y_0 = [\vec{x}_s, \vec{p}(\vec{x}_s), T(\vec{x}_s)] = [x_s, y_s, z_s, p_x(\vec{x}_s), p_y(\vec{x}_s), p_z(\vec{x}_s), 0]$$

2. per ogni incremento spaziale, per il quale si vuole calcolare la soluzione corrente, si costruisce il sistema di equazioni differenziale come riportato in 4.8:

$$dY_1 = s;$$

$$dY_2 = s_x$$

$$dY_3 = s_y$$

$$dY_4 = s_z$$

$$dY_5 = \frac{p_x}{s} dx$$

$$dY_6 = \frac{p_y}{s} dy$$

$$dY_7 = \frac{p_z}{s} dz$$

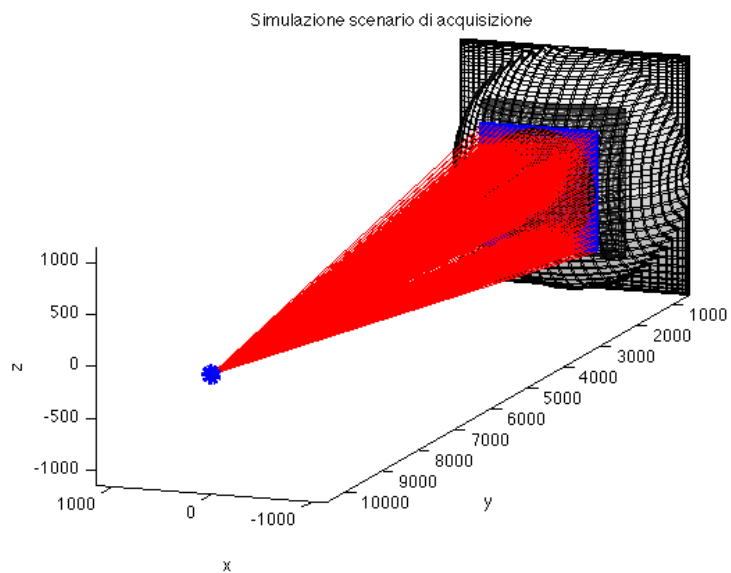
dove d_x, d_y, d_z indicano gli incrementi spaziali lungo le direzioni x, y, z . Ad ogni passo d'integrazione dr , definite le condizioni iniziali strettamente legate alla posizione corrente del raggio, si richiama una funzione che, attraverso il metodo di *Runge-Kutta* [25], integra il sistema fornendo un vettore che contiene principalmente:

- componenti spaziali del vettore lentezza nel punto di arrivo, $(\vec{p}(\vec{x}_s))$: definiscono la direzione di arrivo del raggio che, al passo successivo, coincide con la nuova direzione di partenza;
- coordinate spaziali del punto di arrivo, (\vec{x}'_s) .

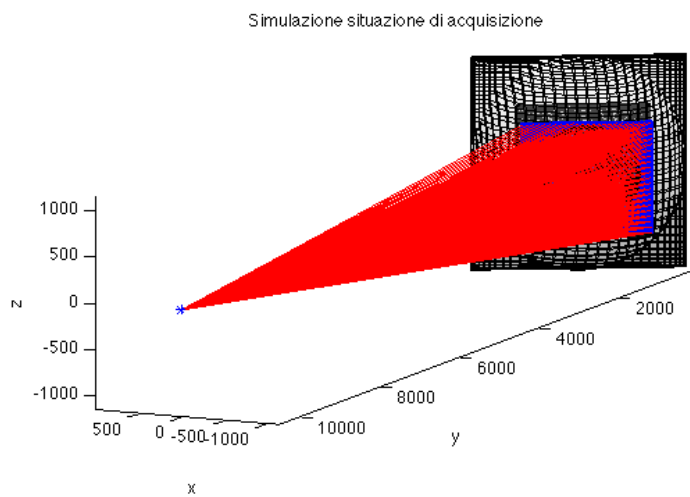
E' necessario tener presente che il passo d'integrazione deve essere sufficientemente piccolo e tale da permettere al simulatore di "sperimentare" l'effetto delle discontinuità;

3. ricerca e memorizzazione delle coordinate del punto d'incidenza del raggio rifratto, sull'iride.

A valle dell'operazione di tracing, avendo determinato le coordinate di tutti i punti d'incidenza sull'iride, otteniamo un reticolo di punti che, per effetto delle discontinuità superficiali, cornea e umor acqueo, risulta distorto se confrontato con il reticolo di partenza, costruito geometricamente e indipendentemente dalla presenza delle discontinuità.



(a) *Acquisizione frontale.*



(b) *Acquisizione off-angle.*

Figura 4.6: Ray tracing

4.4 Correzione immagine con iride centrale

L'immagine acquisita, anche nel caso di acquisizione ortogonale, è affetta dalle distorsioni introdotte per effetto delle discontinuità che, dall'esterno verso l'interno, precedono l'iride.

L'obiettivo dell'algoritmo di correzione è quello di generare, partendo dall'immagine acquisita, un'immagine in cui non compaiano le distorsioni introdotte da cornea e umor acqueo.

Per determinare le correzioni da applicare all'immagine è necessario studiare il comportamento refrattivo dell'occhio umano, dall'esterno verso l'interno. Ciò viene fatto riproducendo la situazione reale d'acquisizione ed effettuando il ray tracing sul modello da noi reato, discusso nel capitolo precedente.

E' chiaro che, dimensionalmente, modello e immagine acquisita devono essere legati tra loro perché sia possibile riprodurre, in maniera coerente con la situazione reale di acquisizione, l'effetto distorcente delle discontinuità.

La segmentazione dell'immagine, operazione preliminare del nostro algoritmo, serve a estrarre dall'immagine stessa le dimensioni in pixel dell'iride catturato con le quali possiamo ricavare un parametro di zoom indispensabile nella costruzione del reticolo in corrispondenza dell'iride (Fig. 4.7). Tale parametro, calcolato come rapporto tra le dimensioni in pixel dell'iride contenuto nell'immagine (in x o in y) e le dimensioni fisiche dell'iride nel modello, rappresenterà la distanza tra punti adiacenti del reticolo.

Nota la posizione della camera, \vec{x}_s , e costruito il reticolo di punti sul piano dell'iride, si determinano le angolazioni dei raggi (θ_i, ϕ_j) che partendo da un punto sorgente, in assenza di discontinuità, raggiungono i punti del reticolo costruito.

Per ogni angolazione si ricava la traiettoria del raggio effettuando il tracing sul modello in presenza delle discontinuità e si determina il punto d'incidenza del raggio rifratto all'altezza dell'iride.

Il numero di raggi da tracciare è quindi pari al numero di pixel costituenti la ROI estratta in fase di segmentazione, $N_{ray} = N_z \cdot N_x$, essendo N_z il numero di righe e N_x il numero delle colonne della ROI.

A valle dell'operazione di tracing, determinate le coordinate di tutti i punti d'incidenza dei raggi rifratti in corrispondenza dell'iride, si ottiene così un

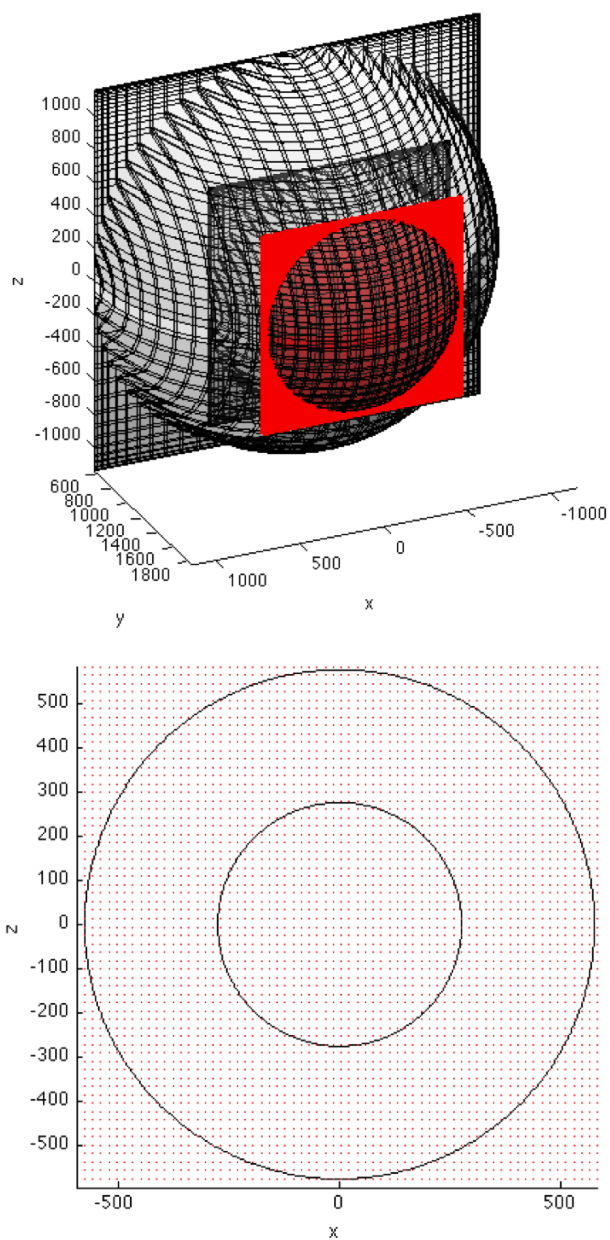


Figura 4.7: Reticolo di campionamento in corrispondenza dell'iride inserito nel modello 3D: in alto viene raffigurata il posizionamento della griglia all'interno del modello, in basso è rappresentata la griglia in corrispondenza dell'iride, sottocampionata di un fattore 5.

nuovo reticolo in cui i punti che vi appartengono risultano variamente spaziatati in entrambe le direzioni data la non linearità dell'effetto distortore (Fig. 4.8).

In figura 4.9, viene rappresentato graficamente l'effetto introdotto dalle discontinuità: i punti d'incidenza in corrispondenza dell'iride (punti rossi), rispetto a quelli che costituiscono il piano di partenza (punti neri), vengono compressi (freccie blu), dove la compressione è maggiore ai bordi per effetto del maggior angolo d'incidenza. L'effetto di compressione è simmetrico sia rispetto all'asse orizzontale che rispetto a quello verticale, poiché la sorgente è allineata rispetto al centro della sclera. Utilizzando il parametro di zoom,

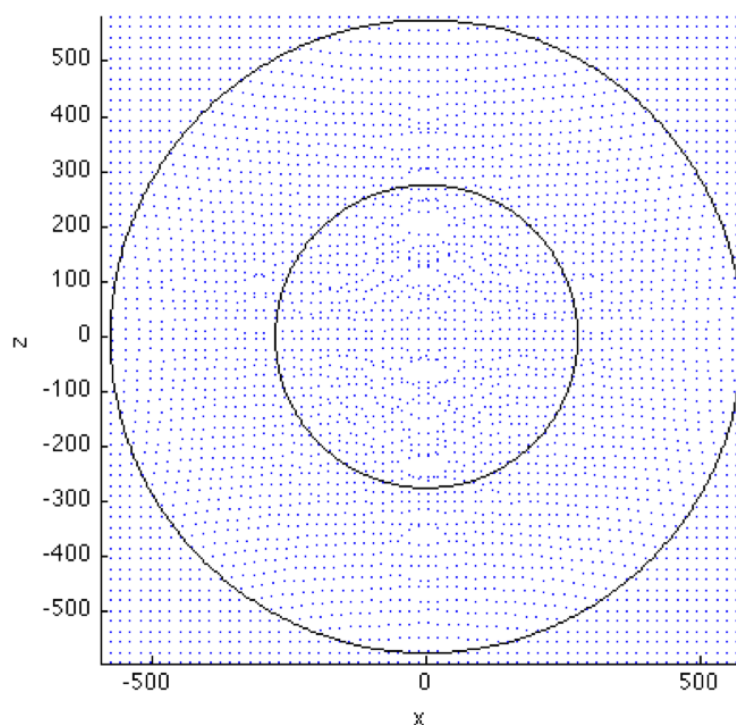


Figura 4.8: Reticolo di punti ottenuto a valle del tracing.

il reticolo ottenuto viene scalato in modo che i suoi estremi (4 angoli) coincidano con quelli del supporto dell'immagine.

Dato che l'immagine acquisita rappresenta il campionamento spaziale uniforme delle intensità registrate dal sensore CCD del dispositivo di acquisizione, assumiamo che la griglia di punti ottenuta a valle del tracing rappresenti il

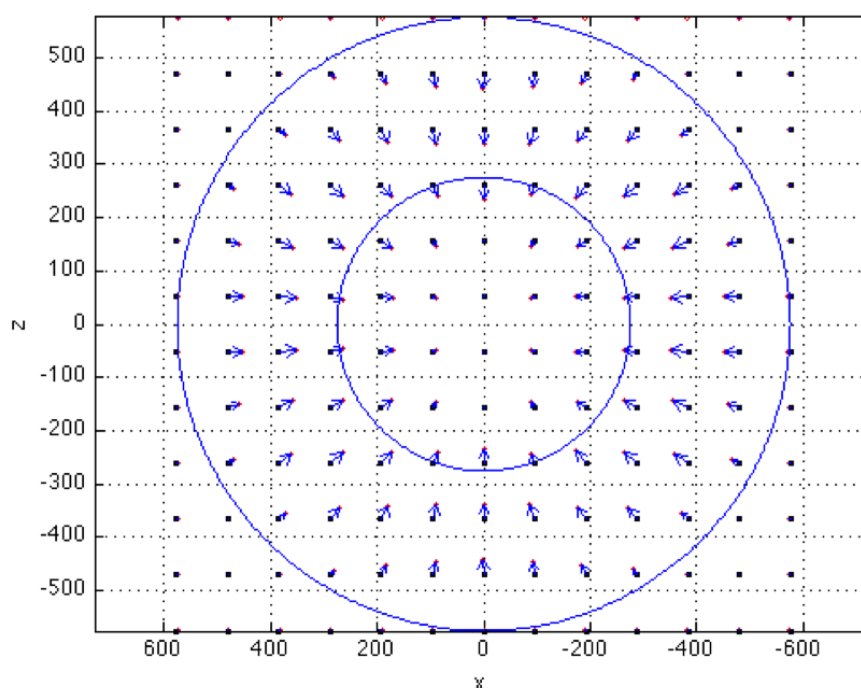


Figura 4.9: Effetto introdotto dalle discontinuità.

supporto reale dell'immagine prima del campionamento uniforme.

Questo significa considerare il supporto dell'immagine, per definizione uniforme, come la versione uniformemente campionata del reticolo di punti ottenuto a valle dell'operazione di tracing.

Il passo successivo consiste nell'attribuire a ogni punto del reticolo ottenuto in simulazione, un valore d'intensità.

Ciò viene fatto partendo dai valori d'intensità associati ai pixel dell'immagine ed effettuando un'interpolazione con il metodo *IDW* (*Inverse Distance Weighted*).

L'interpolazione *IDW* si basa sull'assunzione che la superficie interpolante, costituita dai valori d'intensità dell'immagine montata sul supporto ottenuto a valle dell'operazione di tracing, sia influenzata maggiormente dai punti vicini e in misura minore dai pixel più lontani. La superficie interpolante corrisponde alla media pesata dei punti da interpolare dove il peso assegnato a ciascun punto diminuisce all'aumentare della distanza dal punto d'interpolazione.

Dopo aver determinato le intensità di ogni punto del reticolo ottenuto considerando la presenza delle discontinuità, ogni punto viene riportato nella posizione di partenza ovvero quella che si otterrebbe trascurando le disomogeneità del mezzo.

Dal punto di vista pratico, il flusso di operazioni da eseguire è:

1. ricerca, per ogni punto d'interpolazione della griglia non uniforme, dei 4 pixel a distanza minima appartenenti all'immagine acquisita, di cui si memorizzano le intensità e le rispettive distanze dal punto d'interpolazione;
2. calcolo dell'intensità da attribuire al punto d'interpolazione attraverso IDW dove il peso assegnato a ciascun punto coincide con l'inverso della distanza calcolato al quadrato:

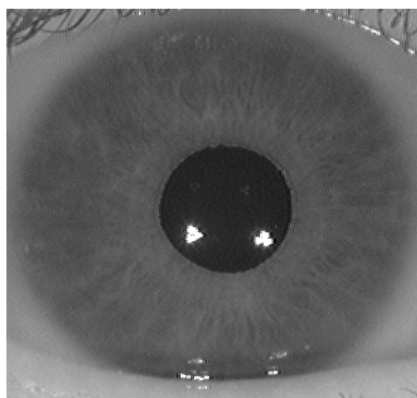
$$\bar{I}_j = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_{i,j}^2} I_i}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_{i,j}^2}}$$

3. ricollocazione del punto d'interpolazione nella posizione originale, prelevata dal reticolo iniziale costruito trascurando le discontinuità presenti.

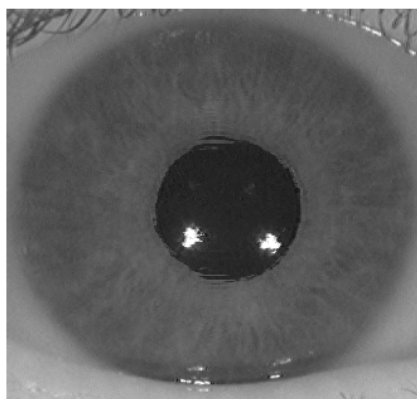
L'insieme delle intensità dei pixel così ottenuti rappresenta un'immagine della stessa iride di partenza in cui però sono state rimosse le distorsioni introdotte dagli strati che proteggono l'iride, in particolare cornea e umor acqueo.

In figura 4.10 si mostra l'effetto delle correzioni applicate: l'iride contenuta nell'immagine costruita rimuovendo le distorsioni introdotte dalle discontinuità, risulta sempre di forma circolare, ma espansa.

Le operazioni descritte vengono eseguite su altre immagini contenenti iridi centrali in modo da poter costruire, partendo dal database di iridi centrali distorte, un nuovo database formato solo dalle immagini corrette.



(a) ROI estratta dall'immagine originale.



(b) ROI in cui sono state rimosse le distorsioni introdotte dalle discontinuità.

Figura 4.10: Confronto tra immagine originale e immagine corretta

4.5 Correzione immagine con iride non centrale

L'immagine acquisita considerando un'angolazione non nulla tra sguardo e centro ottico del dispositivo di acquisizione, oltre a contenere l'effetto distorcente introdotto dagli strati superficiali del bulbo oculare, legata strettamente all'angolo di acquisizione (*Legge di Snell*), coincide con una rappresentazione distorta della realtà.

In queste condizioni l'iride non appare più di forma circolare bensì di forma ellittica, essendo l'immagine la proiezione nel piano frontale del bulbo oculare ruotato attorno al centro della sclera (Fig. 4.11).

Come nel caso precedente, per legare dimensionalmente gli elementi pre-

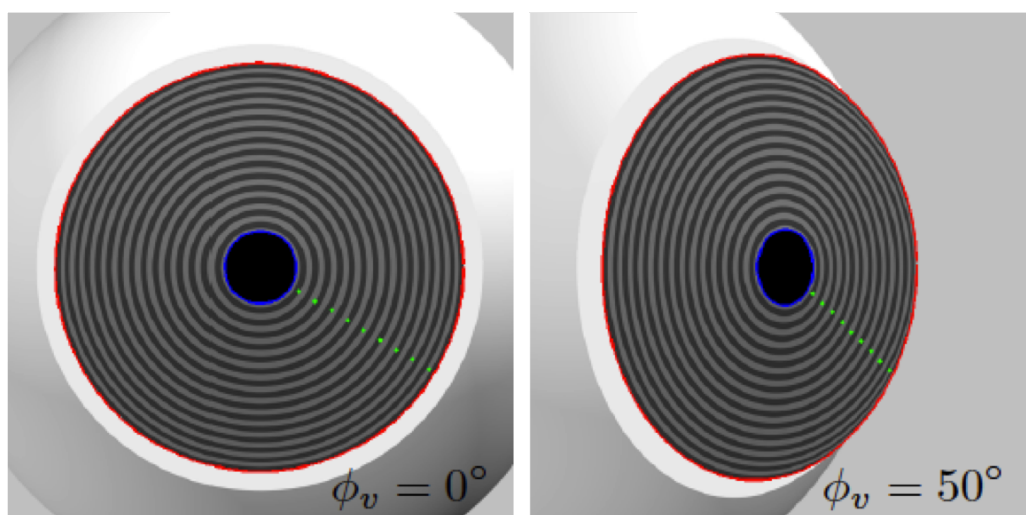


Figura 4.11: Distorsione di forma dell'iride nell'immagine introdotta dall'acquisizione con angolo di vista $\phi_v \neq 0$.

senti nell'immagine con quelli presenti nel modello considerato, ora ruotato attorno al centro sclera di un angolo pari a quello dello sguardo (ϕ_v), si effettua una prima segmentazione (Fig. 4.12) utilizzando l'algoritmo descritto nel paragrafo 4.2.

Attraverso la segmentazione si ricavano le coordinate dei punti appartenenti all'ellisse che descrive il contorno tra iride e sclera all'interno dell'immagine. Poiché l'iride contenuto nell'immagine rappresenta la proiezione dell'iride

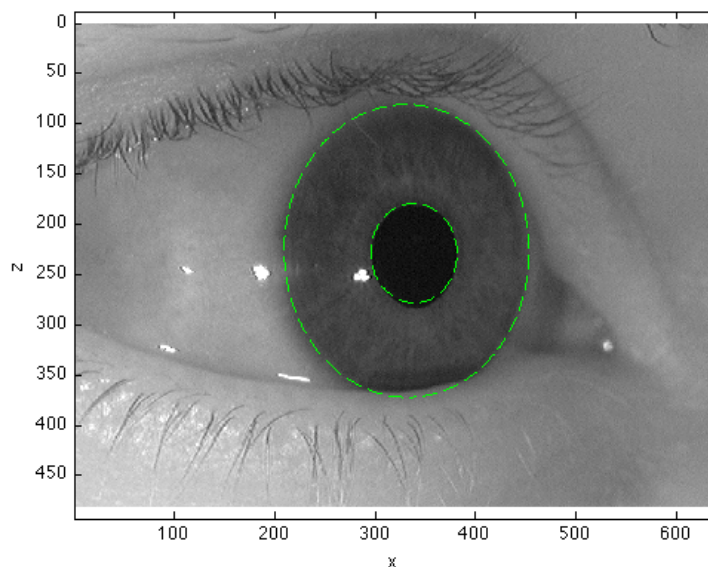


Figura 4.12: Segmentazione immagine acquisita.

ruotato secondo la direzione di vista, per calcolare il parametro di zoom si effettua il rapporto tra le dimensioni dell'asse maggiore (o minore) dell'iride del modello ruotato proiettato nel piano frontale, e le dimensioni dell'asse maggiore (o minore) del contorno iride-sclera.

L'algoritmo di correzione ha come obiettivo quello di fornire in uscita, partendo dall'immagine acquisita, un'immagine della stessa iride ma centrata, come se questa provenisse da un'acquisizione con angolo di vista $\phi_v = 0$ (ortogonale). Il supporto dell'immagine in uscita deve essere quindi fisicamente più grande nella direzione orizzontale, quella compressa in fase di acquisizione a causa della rotazione del bulbo, e quindi deve contenere un maggior numero di pixel.

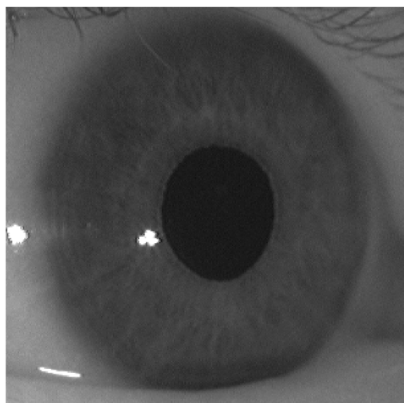
Per determinare il numero di punti da considerare nella costruzione del reticolo di campionamento usato in fase di tracing per l'analisi delle distorsioni, abbiamo considerato il numero di pixel di una nuova regione ottenuta applicando a quella estratta una trasformazione affine tramite l'operatore di

trasformazione:

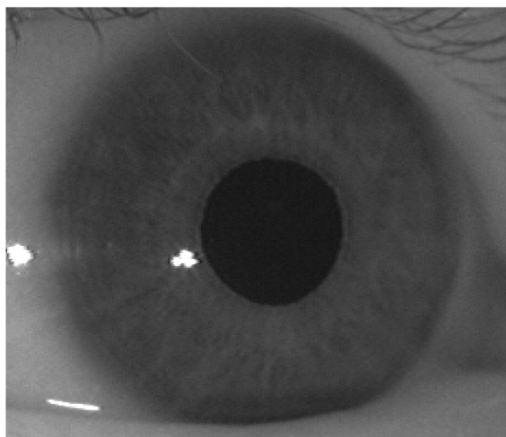
$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos(\phi_v)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dove ϕ_v è l'angolo di vista.

Questa trasformazione serve per riportare la geometria dell'immagine al



(a) ROI estratta dall'immagine acquisita con angolo di vista $\phi_v = 30^\circ$:
 $N_x = 305$, $N_z = 302$.



(b) ROI a cui è stato applicato l'operatore di trasformazione T : $N_x = 353$, $N_z = 302$.

Figura 4.13: Trasformazione affine della regione estratta dall'immagine acquisita.

caso di angolo di vista nullo.

La regione trasformata risulta corretta solo geometricamente: appare dilatata in direzione orizzontale, direzione lungo la quale, per effetto dell'acquisizione con angolo di vista non nullo, si era ottenuta la compressione in fase di acquisizione (Fig. 4.13).

In realtà la regione estratta dall'immagine viene assunta leggermente più grande sia nella direzione orizzontale che in quella verticale, per evitare l'introduzione di artefatti nell'immagine corretta.

Una volta ricavato il numero di punti necessari per comporre il piano di riferimento ortogonale al bulbo oculare, campionato uniformemente con passo pari al parametro di zoom, lo si ruota in accordo con l'angolo di vista e lo si inserisce nel modello, in modo che risulti complanare all'iride (Fig. 4.14).

Considerando nuovamente la sorgente in linea con il centro della sclera e a distanza $d = 101.6$ mm, si calcolano le angolazioni dei raggi da emettere perché sia possibile raggiungere, in condizioni di omogeneità del mezzo, ogni punto del reticolo.

Inizia poi la fase del tracciamento dei raggi in cui, per ogni angolazione considerata, si ricava il percorso del raggio dalla posizione di camera fino all'incidenza sull'iride. Come nel caso precedente, a valle del ray tracing, si ottiene il nuovo reticolo (Fig. 4.16) formato dai punti d'incidenza sull'iride che risultano essere spazati in modo non uniforme in entrambe le direzioni data la non linearità dell'effetto di distorsione, che in questo caso risulta più marcato dato l'angolo di vista non nullo (acquisizione non ortogonale).

In figura 4.15, viene rappresentato graficamente l'effetto introdotto dalle discontinuità: i punti d'incidenza in corrispondenza dell'iride (punti rossi), rispetto a quelli che costituiscono il piano di partenza (punti neri), vengono compressi in modo asimmetrico rispetto all'asse orizzontale (freccie blu); ciò avviene poiché la sorgente non è allineata con il centro della sclera ma forma con essa un angolo pari a $\phi_v = 30^\circ$. Laddove l'angolo d'incidenza è maggiore (destra), la compressione è maggiore. Successivamente abbiamo scalato la proiezione del reticolo ottenuto nel piano frontale usando il parametro di zoom in modo da riportare gli estremi del suo dominio di definizione, solidali a quelli della regione estratta dall'immagine acquisita.

Assumiamo ora che la griglia dell'immagine acquisita corrisponda alla versio-

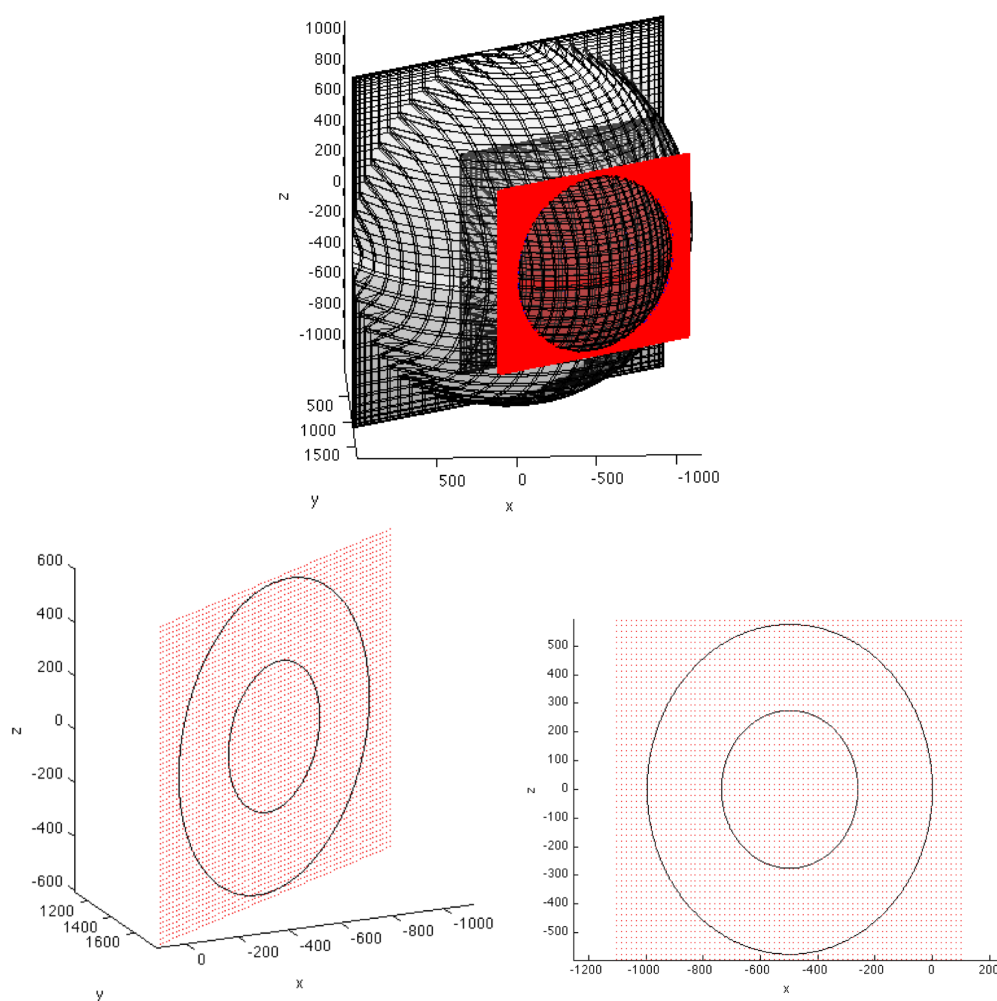


Figura 4.14: Reticolo di campionamento inserito in corrispondenza dell'iride del modello 3D: in alto viene raffigurata il posizionamento della griglia all'interno del modello, in basso è rappresentata la geometria 2D e 3D della griglia in corrispondenza dell'iride, sottocampionata di un fattore 5.

ne campionata in maniera spazialmente uniforme del reticolo ottenuto tenendo conto delle disomogeneità del mezzo e ricaviamo le intensità da associare a ogni punto ottenuto, attraverso il metodo d'interpolazione IDW descritto nel paragrafo precedente.

Infine, per ottenere la regione d'interesse corretta (Fig. 4.17), ricollochiamo ogni punto del reticolo nella corrispondente posizione originale, prelevata dal

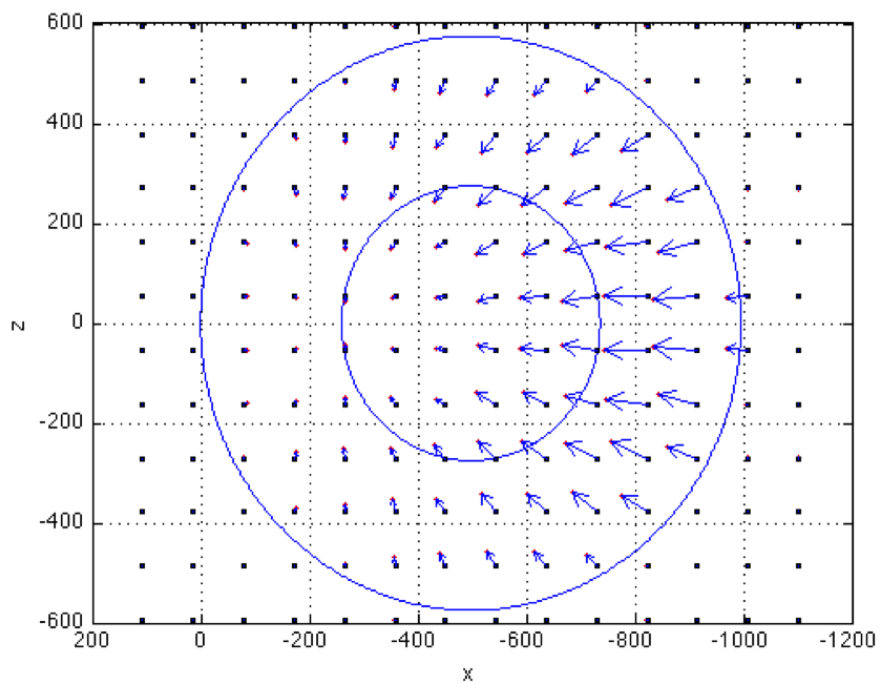


Figura 4.15: Effetto introdotto dalle discontinuità.

reticolo costruito prima della rotazione di ϕ_v e a prescindere dalla presenza delle discontinuità del modello associate agli strati superficiali che proteggono l'iride.

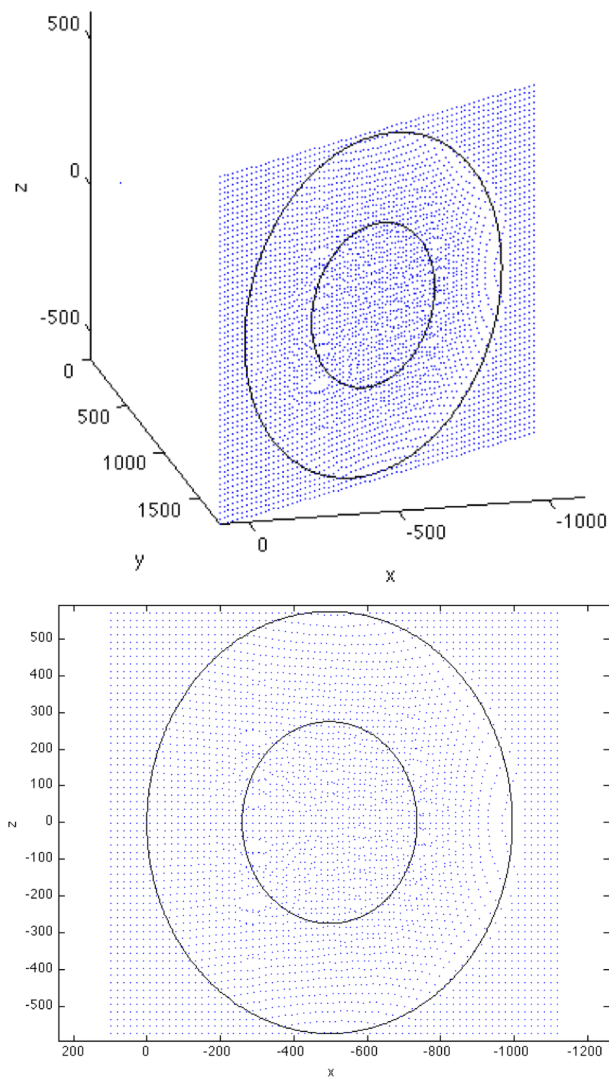
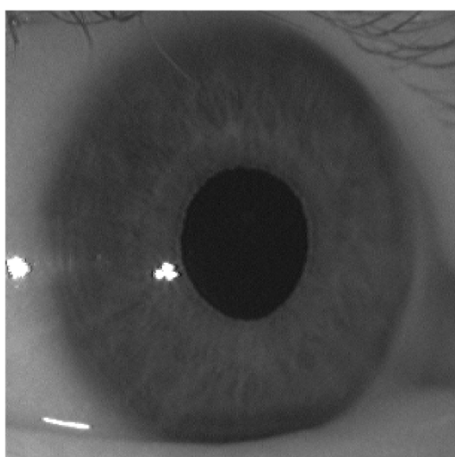
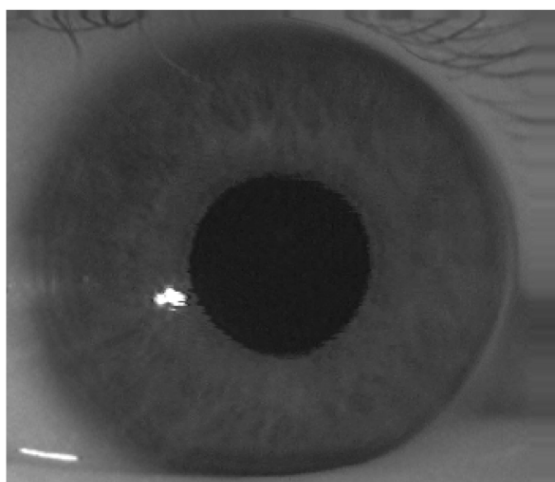


Figura 4.16: Reticolo di punti ottenuto a valle del tracing: a sinistra è rappresentato nello spazio tridimensionale, a destra la sua proiezione nel piano frontale.



(a) ROI estratta dall'immagine originale.



(b) ROI in cui sono state rimosse le distorsioni introdotte dalle discontinuità.

Figura 4.17: Confronto tra immagine originale e immagine corretta

Capitolo 5

Risultati

5.1 L'effetto distorcente della cornea

Il primo passo per l'implementazione di un metodo che compensi le distorsioni presenti all'interno dell'immagine acquisita, consiste nel simulare come queste distorsioni vengono introdotte all'interno dell'immagine.

Dopo una prima fase di modellizzazione dell'occhio umano, in cui si è cercato di rispettare geometrie e parametri fisici dei vari strati che lo compongono, è stata utilizzata la tecnica del tracciamento di raggi per valutare la deformazione di un reticolo virtuale introdotto in corrispondenza dell'iride, inizialmente formato da punti equispaziati tra loro in entrambe le direzioni. Per riprodurre gli scenari di acquisizione, ortogonale e non ortogonale, queste operazioni sono state effettuate mantenendo fissa la posizione della camera e considerando dapprima l'iride del modello perfettamente in asse con la camera, e successivamente ruotando il modello per simulare la rotazione dello sguardo di un angolo pari a $\phi_v = 30^\circ$.

In figura 5.1 viene rappresentato l'effetto distorcente introdotto nell'immagine acquisita frontalmente, dagli strati che proteggono l'iride; la maggior parte della distorsione presente nell'immagine è da attribuire alla presenza della cornea dato che, dall'esterno (aria con $n = 1$) verso l'interno, la luce incide prima sulla cornea ($n_{cornea} = 1.376$) e poi viene rifratta nell'umor acqueo, ($n_{umoracqueo} = 1.336$), per poi propagarsi fino all'iride.

L'effetto distorcente, seppur non lineare, in questa situazione risulta esse-

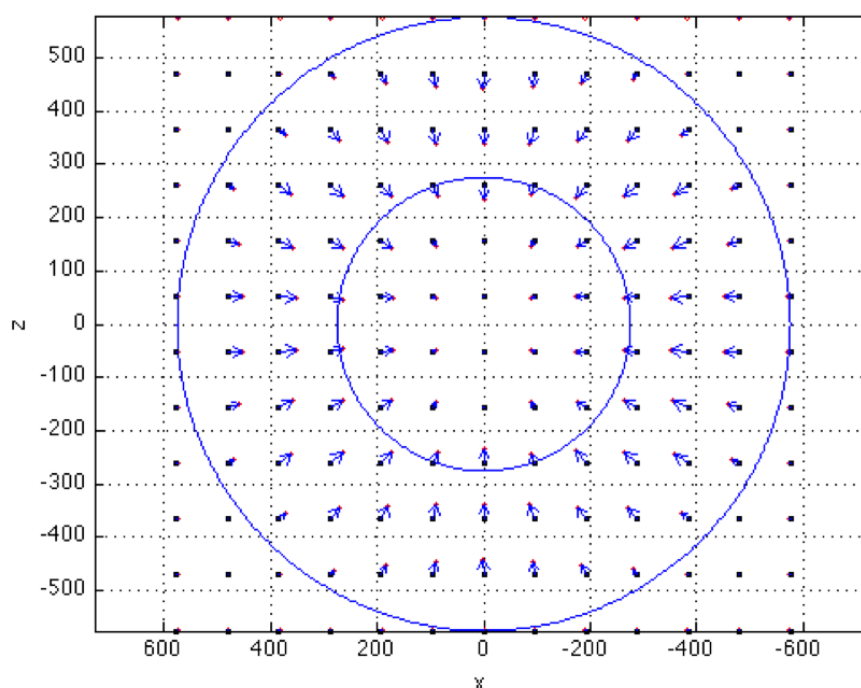


Figura 5.1: Distorsioni nell'acquisizione ortogonale.

re simmetrico sia rispetto all'asse verticale che rispetto a quello orizzontale; ciò accade perché la sorgente è perfettamente allineata con l'iride perciò, gli angoli d'incidenza, così come i punti d'incidenza sulla superficie corneale, risultano essere simmetrici rispetto ad entrambi gli assi.

L'effetto introdotto da questo tipo di distorsione nell'immagine acquisita consiste in una leggera compressione dell'iride e della pupilla dove la compressione aumenta allontanandosi dal centro della pupilla. Data la morfologia e le proprietà della cornea, infatti, per effetto dell'incidenza con angoli maggiori, valutati rispetto alla direzione normale al piano tangente al punto d'incidenza, aumentano gli angoli di rifrazione e quindi la deviazione del punto d'incidenza reale sull'iride rispetto al punto corrispondente appartenente al reticolo uniforme, costruito senza tener conto delle discontinuità (spazio libero).

In figura 5.2 si presenta la proiezione nel piano frontale dell'effetto distorcente introdotto dalle discontinuità superficiali, durante l'acquisizione dell'immagine da una vista non ortogonale. Si considera che il soggetto non stia

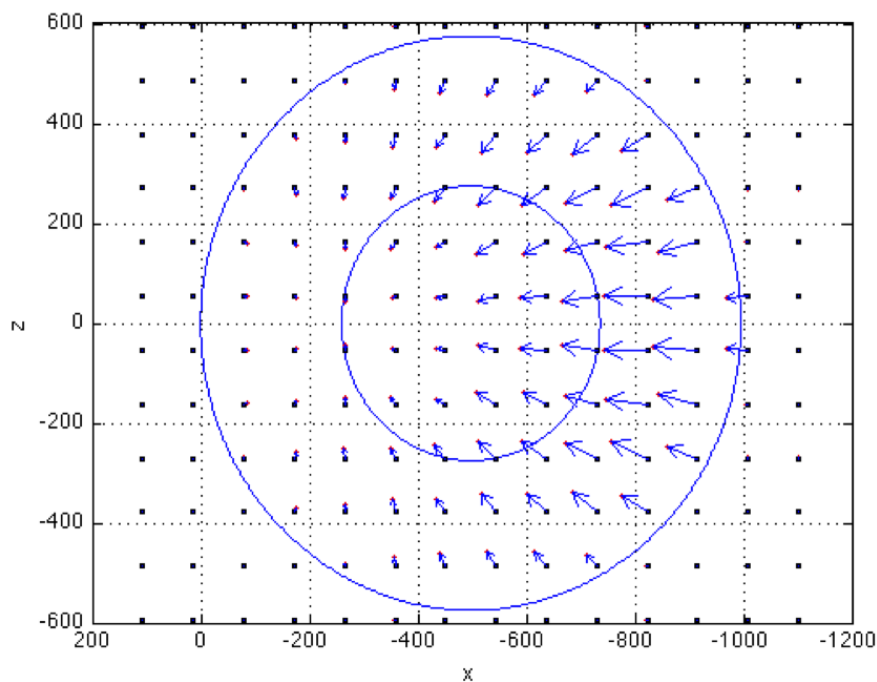


Figura 5.2: Distorsioni nell'acquisizione non ortogonale.

guardando l'obiettivo ma un punto posto alla stessa quota, tale che l'angolazione (in azimuth) del suo sguardo rispetto al centro della camera sia pari a $\phi_v = 30^\circ$.

Oltre alla variazione di forma dell'iride, ottenuta poiché nell'immagine compare la sua proiezione nel piano frontale, si osserva come l'effetto distorcente in questo caso sia simmetrico rispetto all'asse orizzontale ma non rispetto a quello verticale, e localizzato prevalentemente in corrispondenza dei punti più lontani dalla sorgente.

In questo caso dobbiamo tener presente che parte dell'informazione è stata persa irrimediabilmente per effetto dell'acquisizione non frontale, mentre un'altra parte dell'informazione è stata distorta dagli strati che proteggono l'iride.

Per rendere possibile il riconoscimento dell'iride in questa situazione è necessario quindi cercare di compensare le distorsioni introdotte.

Per verificare la correttezza dei risultati ottenuti in fase di simulazione

con MATLAB[®], oltre a effettuare delle prove di riconoscimento confrontando le immagini a valle dell'applicazione delle correzioni calcolate, abbiamo riprodotto con LightWave[®] la fase di acquisizione.

Questo software comprende un ambiente di modellizzazione, chiamato *Modeler*, che consente di costruire modelli 3D e di specificare le proprietà fisiche delle superfici che lo compongono (coefficienti di riflessione, indici di rifrazione, ecc...), e un ambiente per la ricostruzione di scene tridimensionali, chiamato *Layout*, in cui è possibile posizionare eventuali sorgenti di illuminazione e/o camere per effettuare acquisizione di immagini degli oggetti considerati o per effettuarne il rendering.

In base alle caratteristiche delle superfici che costituiscono il modello 3D costruito (*Modeler*), LightWave[®] è in grado di effettuare il *rendering* dell'oggetto in accordo con la la scena 3D in cui il modello viene inserito (*Layout*). Attraverso l'operazione di rendering si vuole ottenere una rappresentazione realistica dell'oggetto, in relazione alle fonti di illuminazione che lo circondano.

Ciò viene ottenuto con un algoritmo che effettua il ray tracing e che prevede essenzialmente due passi [1]:

- illuminazione: è la fase in cui si tracciano i raggi dalle sorgenti di luce fino al mezzo, dove si assegna per ogni raggio una certa quantità di energia. I raggi incidenti sul modello, in accordo con le proprietà delle superfici che compongono il mezzo stesso, possono subire riflessione, rifrazione, diffusione o essere assorbiti; dato che ciascun raggio si propaga verso il mezzo, in corrispondenza del quale modifica la sua direzione per effetto di rifrazioni e riflessioni multiple, per ogni punto d'intersezione tra raggio e generica superficie del modello, a seconda delle caratteristiche della superficie stessa, il raggio depositerà una certa quantità di energia su di essa;
- costruzione delle mappe d'illuminazione: è la fase in cui vengono memorizzate le informazioni generate durante la fase di illuminazione. Tali informazioni vengono organizzate in una matrice rettangolare in cui ogni elemento, corrispondente a un punto d'incidenza sul modello con-

siderato, rappresenta il valore di illuminazione in tale punto. Dato che durante la fase d'illuminazione ogni punto può accumulare energia, la matrice è soggetta a continuo aggiornamento.

Il nostro obiettivo è valutare come l'iride nell'immagine acquisita venga distorta per effetto delle superfici più esterne dell'occhio umano, cornea e umore acqueo.

In particolare, abbiamo sfruttato le potenzialità di LightWave[®] per verificare la correttezza dell'effetto distorcente ottenuto nelle simulazioni effettuate in ambiente MATLAB[®], all'interno del quale abbiamo utilizzato il metodo dell'iconale per il tracciamento dei raggi.

L'esperimento in Lightwave[®] ha coinvolto principalmente tre fasi: modellizzazione, creazione della scena, creazione dell'immagine.

Attraverso Modeler è stato costruito il modello dell'occhio umano, conside-

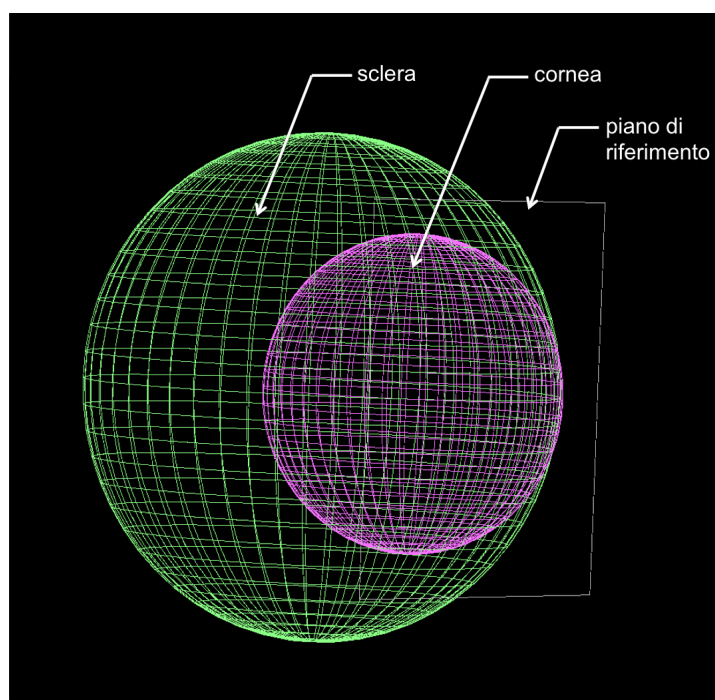


Figura 5.3: Modello Lightwave.

rando i parametri geometrici e le proprietà ottico-fisiche delle superfici che lo compongono già utilizzati in fase di modellizzazione in ambiente MATLAB[®], figura 5.3.

Nel modello così creato abbiamo poi inserito una *texture* a scacchiera in corrispondenza dell'iride; questa viene assunta come l'immagine obiettivo, ovvero quella che verrebbe acquisita in assenza di distorsioni.

All'interno dell'ambiente Layout è stato riprodotto lo scenario di acquisizione; abbiamo posizionato le sorgenti luminose e la camera per l'acquisizione dell'immagine del modello creato.

Dopo aver importato il modello all'interno della scena, abbiamo effettuato il tracing con LightWave[®] per generare l'immagine acquisita nelle due situazioni: $\phi_v = 0^\circ$ e $\phi_v = 30^\circ$. Come nelle simulazioni in ambiente MATLAB[®], la camera rimane in posizione fissa mentre il bulbo oculare ruota rispetto al centro della sclera, in accordo con l'angolo di vista da considerare per l'acquisizione dell'immagine.

Nella fase di tracing, per ogni pixel dell'immagine viene tracciato un raggio

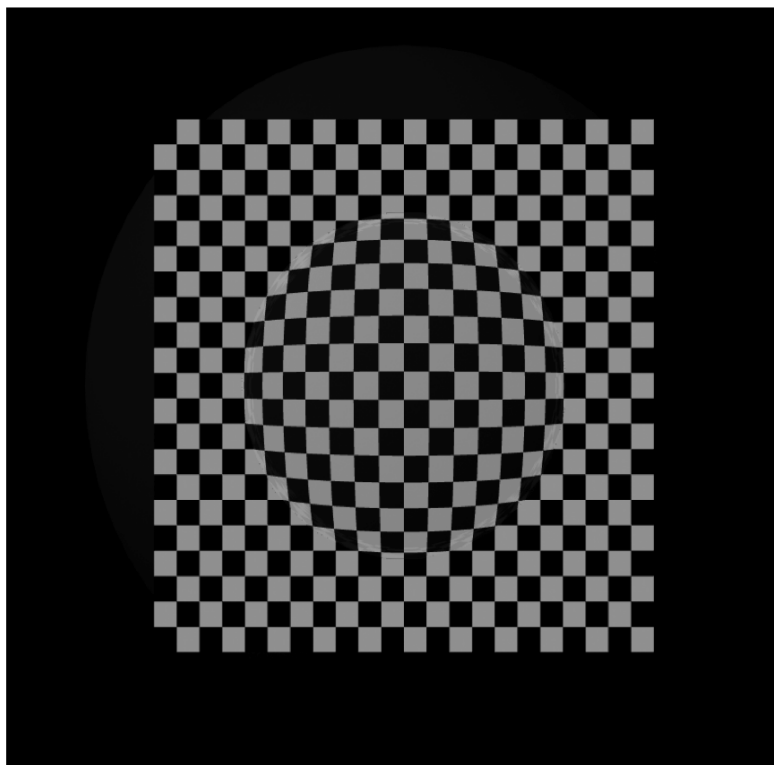


Figura 5.4: Deformazione della griglia per acquisizione ortogonale.

e si valuta il suo percorso da camera a iride (scacchiera); l'intensità del punto d'incidenza sulla texture, viene riportata in corrispondenza del pixel del

piano immagine, associato al raggio tracciato.

Dalle immagini acquisite si nota chiaramente l'effetto distorcente delle discontinuità (Figg. 5.4 e 5.5) e in particolare, per:

- $\phi_v = 0^\circ$ (acquisizione ortogonale)
 - i quadrati all'interno della griglia si deformano per effetto dei salti d'indice, soprattutto in corrispondenza del bordo (angolo d'incidenza maggiore);
 - la deformazione ottenuta è simmetrica rispetto all'asse orizzontale e verticale;
 - il dominio (forma) della griglia non cambia
- $\phi_v = 30^\circ$ (acquisizione non ortogonale):
 - l'effetto della deformazione non è simmetrico rispetto all'asse verticale: poiché la camera è spostata a sinistra rispetto al centro della sclera, si avrà maggior distorsione dei punti più lontani dalla camera (destra), quelli per cui si ha angolo d'incidenza, e quindi di rifrazione, maggiore
 - la schiera risulta compressa orizzontalmente

I risultati ottenuti con questa seconda simulazione confermano quindi quelli ottenuti con l'algoritmo per il calcolo delle distorsioni implementato in ambiente MATLAB[®].

5.2 Riconoscimento dell'individuo

Utilizzando un motore di riconoscimento gratuito, GIRIST, abbiamo effettuato dei test per verificare l'efficacia delle correzioni applicate alle immagini, sia per la fase di *identificazione* che per la fase di *verifica*.

Per testare l'efficacia dell'algoritmo di correzione verranno considerati due *database*, quello originale e quello contenente le immagini frontali a valle delle correzioni, e due *dataset*.

Non avendo a disposizione un numero sufficiente di immagini campione e

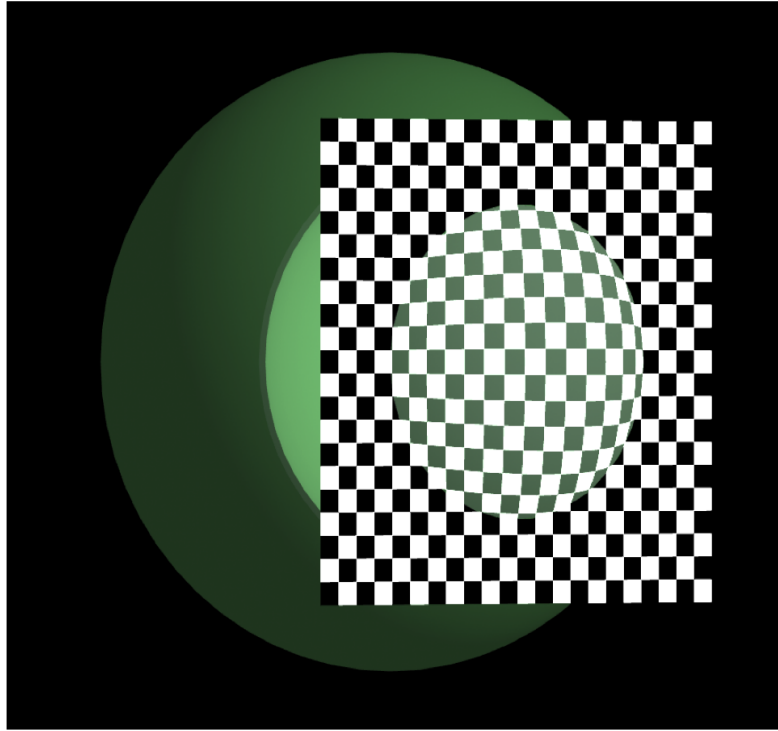


Figura 5.5: Deformazione della griglia per acquisizione non ortogonale ($\phi_v = 30^\circ$).

non potendo quindi ricavare un valore di soglia per la distanza di Hamming, questa viene assunta pari a $HD_{thresh} = 0.36$ come suggerito in [11]. Il primo dataset di immagini è stato ricavato partendo dalle acquisizioni non ortogonali e applicando l'operatore di trasformazione:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos(\phi_v)} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

dove ϕ_v è l'angolo di vista, fornito come dato unitamente alle immagini acquisite (30°).

Le immagini così ottenute vengono corrette solo geometricamente; attraverso la dilatazione dell'asse orizzontale, l'iride torna a essere di forma approssimativamente circolare.

Il secondo dataset contiene invece le immagini ottenute eliminando, attraverso l'algoritmo di correzione, le distorsioni introdotte da cornea e umore

acquero in fase di acquisizione.

5.2.1 Test di autenticazione

In questa sezione vengono riportati i risultati ottenuti con il sistema di riconoscimento simulando le fasi di verifica e identificazione.

La verifica consiste in un confronto uno a uno e ha l'obiettivo di determinare se vi è corrispondenza tra l'impronta biometrica della persona in esame e l'impronta individuata in archivio attraverso una dichiarazione d'identità.

L'identificazione consiste in un confronto tra l'immagine acquisita relativa all'utente presente al punto di controllo e tutte le immagini presenti all'interno del database. Attraverso l'identificazione si vuole determinare se l'impronta biometrica dell'utente può essere associata a una di quelle già presenti nell'archivio.

Vengono prima simulate le fasi di verifica e, successivamente si effettuano i test di identificazione per controllare che, attraverso le correzioni introdotte, il sistema di riconoscimento è in grado di individuare un utente confrontando la sua immagine, a valle delle correzioni, con quelle corrette presenti all'interno del database.

La metrica utilizzata per individuare i benefici introdotti con l'algoritmo di correzione dell'immagine è la distanza di Hamming.

Nei test per la fase di verifica, per ogni soggetto si confrontano prima l'immagine acquisita ortogonalmente con quella a valle delle correzioni geometriche, e dopo l'immagine frontale e quella acquisita con angolo di vista $\phi_v = 30^\circ$ entrambe corrette con il nostro algoritmo.

Come si vede dai risultati mostrati nelle tabelle 5.1, in tre casi su quattro, a valle delle correzioni introdotte con il nostro algoritmo ("Post-correzioni"), il sistema è in grado di verificare l'identità dell'utente poiché la distanza di Hamming scende al di sotto della soglia fissata ($HD_{thresh} = 0.36$), cosa che non avviene in tutti i casi testati considerando semplicemente la correzione geometrica dell'immagine con l'operatore di trasformazione affine ("Pre-correzioni").

		Pre-correzioni		Post-correzioni	
$\phi_v = 30^\circ$	$\phi_v = 0^\circ$	utente 1	HD_{pre}	utente 1	HD_{post}
	utente 1	reject	0.368	accept	0.357

		Pre-correzioni		Post-correzioni	
$\phi_v = 30^\circ$	$\phi_v = 0^\circ$	utente 2	HD_{pre}	utente 2	HD_{post}
	utente 2	reject	0.411	reject	0.393

		Pre-correzioni		Post-correzioni	
$\phi_v = 30^\circ$	$\phi_v = 0^\circ$	utente 3	HD_{pre}	utente 3	HD_{post}
	utente 3	reject	0.363	accept	0.354

		Pre-correzioni		Post-correzioni	
$\phi_v = 30^\circ$	$\phi_v = 0^\circ$	utente 4	HD_{pre}	utente 4	HD_{post}
	utente 4	reject	0.421	accept	0.342

Tabella 5.1: Risultati fase di verifica

In tabella 5.2 vengono riportati i risultati restituiti dal sistema di riconoscimento per i test di identificazione effettuati a monte delle correzioni, mentre in tabella 5.3 si mostrano quelli restituiti considerando le immagini in cui sono state corrette le distorsioni introdotte dai salti d'indice di rifrazione (cornea e umor acqueo), per effetto dell'acquisizione da vista non ortogonale. Considerando i test effettuati sulle immagini corrette solo geometricamente, si evince come la distanza minima, pur essendo relativa all'immagine del da-

tabase del soggetto corrispondente, risulti comunque maggiore della distanza di soglia.

$\phi_v = 30^\circ \backslash \phi_v = 0^\circ$	utente 1	utente 2	utente3	utente4	HD
utente 1	reject				0.368
utente 2		reject			0.411
utente 3			reject		0.363
utente 4				reject	0.416

Tabella 5.2: Test fase di identificazione con immagini acquisite a $\phi_v = 30^\circ$, a valle della correzione geometrica.

Utilizzando le immagini elaborate con l'algoritmo per la compensazione delle distorsioni introdotte dai salti d'indice di rifrazione, si ottiene quindi, in generale, una diminuzione della distanza di Hamming tra i pattern biometrici appartenenti a iridi dello stesso soggetto, una delle quali acquisita frontalmente e l'altra da una vista non ortogonale.

$\phi_v = 30^\circ \backslash \phi_v = 0^\circ$	utente 1	utente 2	utente3	utente4	HD
utente 1	accept				0.357
utente 2		reject			0.393
utente 3			accept		0.354
utente 4				accept	0.342

Tabella 5.3: Test per la fase di identificazione con immagini acquisite a $\phi_v = 30^\circ$, a valle della compensazione delle distorsioni introdotte dai salti d'indice di rifrazione.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Durante lo svolgimento del progetto di tesi ho avuto modo di studiare alcune problematiche legate all'acquisizione delle immagini per il riconoscimento dell'iride, concentrandomi particolarmente sulle distorsioni introdotte per effetto delle proprietà fisiche e della morfologia che caratterizzano gli strati superficiali dell'occhio umano le quali, oltre a proteggere l'iride dall'ambiente esterno, rifrangono la luce in ingresso per focalizzarla sulla retina. Attraverso uno studio dell'anatomia e della fisiologia dell'occhio umano, dopo aver condotto un'analisi sulle modalità attraverso le quali tali distorsioni vengono introdotte nell'immagine acquisita, mi è stato possibile introdurre un metodo per la correzione delle immagini acquisite da viste non ortogonali. L'obiettivo dell'algoritmo introdotto è quello di dimostrare che, compensando le distorsioni non lineari presenti nell'immagine dell'iride, diviene possibile riconoscere un individuo anche qualora il contesto nel quale il riconoscimento deve essere inserito, non preveda la collaborazione dell'individuo e non consenta perciò di operare su immagini acquisite da viste non ortogonali. Data l'impossibilità di collezionare un gran numero di immagini contenenti iridi non centrali, abbiamo potuto valutare i benefici introdotti dall'algoritmo di correzione su un numero ridotto di immagini campione. Tuttavia i risultati ottenuti sono incoraggianti: dai test di autenticazione effettuati è emerso che, utilizzando le immagini corrette, la distanza di Hamming tra modelli biometrici appartenenti allo stesso utente ma relativi a immagini acquisite da viste diverse, diminuisce in tutti i casi analizzati ri-

spetto a quella calcolata tra i pattern biometrici originali.

Nella maggior parte dei casi testati, inoltre, tale diminuzione consente di portare la distanza di Hamming al di sotto della distanza di soglia e conseguentemente di rendere possibile l'identificazione del soggetto.

L'efficacia dell'algoritmo di correzione potrà essere migliorata integrando un metodo che tenga conto delle deformazioni elastiche delle fibre contenute all'interno dell'iride in condizione di illuminazione variabile, e includendo maggiori informazioni per la costruzione di un modello più realistico in fase di simulazione.

In fase di enrollment si potrà pensare di utilizzare un topografo corneale per acquisire, unitamente all'immagine, anche la mappa corneale e la relativa mappa refrattiva; in questo modo sarà possibile valutare le distorsioni partendo da dati reali, e quindi in maniera molto precisa.

Siccome l'algoritmo necessita dell'angolo di acquisizione, per estendere l'applicabilità del metodo sarà necessario implementare un sistema di *eye tracking* in grado di fornire l'angolo di acquisizione in fase di autenticazione, in modo da aumentare il livello di automazione e ridurre gli errori associati alla stima imprecisa dell'angolo di acquisizione.

Bibliografia

- [1] J. Arno. Backward ray tracing, 1986.
- [2] Balboni and Motta. *Anatomia Umana*. Edi.Ermes, 2006.
- [3] W. W. Boles. A security system based on human iris identification using wavelet transform. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1998.
- [4] J. Daugman. How iris recognition works. *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY*, 2004.
- [5] J. Daugman. Iris recognition at airports and border-crossings. *Encyclopedia of Biometrics*, 2010.
- [6] Marina Storani de Almeida and Luis Alberto Carvalho. Different schematic eyes and their accuracy to the in vivo eye: A quantitative comparison study. *Brazilian Journal of Physics*, 2006.
- [7] G. Drufuca. Applicazioni del telerilevamento, cap. 13: I raggi, 2006.
- [8] Xin Li et al. Modeling intra-class variation for non ideal iris recognition, 2006.
- [9] Andrew W. Fitzgibbon, Maurizio Pilu, and Robert B. Fisher. Direct least squares fitting of ellipses. *IEEE*, 1996.
- [10] Ministry of Communications Government of India, Department of Information Technology and Information Technology. Iris image data standard for e-governance applications in india, 2010.

- [11] GRUSOFT. Girist: Iris recognition software by grusoft. <http://www.grusoft.com/girist.htm>.
- [12] A.K. Jain, A. Ross, and S. Prabhakar. An introduction to biometric recognition. *IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY*, 2004.
- [13] Kahlil and Abou-Chadi. Generation of iris codes using 1d log-gabor filter. *IEEE*, 2010.
- [14] W. M. K Wan Mohd Khairisfaizal and A. J. Nor'aini. Eyes detection in facial images using circular hough transform. *2009 5th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA)*, 2009.
- [15] W. K. Kong and D. Zhang. Accurate iris segmentation based on novel reflection and eyelash detection model. *Proceedings of 2001 International Symposium on Intelligent Multimedia, Mdeo and Speech Processing*, 2001.
- [16] A. Lefohn, B. Budge, P. Shirley, R. Caruso, and E. Reinhard. An ocularist's approach to human iris synthesis. *IEEE Computer Society*, 2003.
- [17] Li Ma, Yunhong Wang, and Tieniu Tan. Iris recognition based on multichannel gabor filtering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1998.
- [18] L. Masek. Recognition of human iris pattern for biometric identification, 2003.
- [19] Jeffery R. Price, Timothy F. Gee, Vincent Paquit, and Kenneth W. Tobin. On the efficacy of correcting for refractive effects in iris recognition. *IEEE*, 2007.
- [20] S. Pundlik, D. Woodard, and S. Birchfield. Iris segmentation in non-ideal images using graph cuts. *Image and Vision Computing*, 2010.

- [21] Qi-Chuan Tjan, Quan Pan, Yong-Mei Cheng, and Quan-Xue Gao. Fast algorithm and application of hough transform in iris. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 2005.
- [22] West Virginia University. Off axis angle iris dataset collection, release1. <http://www.citer.wvu.edu/>.
- [23] Z. Wei, T. Tan, and Z. Sun. Nonlinear iris deformation correction based on gaussian model. *Center for Biometrics and Security Research*, 2007.
- [24] Wikipedia. Human eye. <http://en.wikipedia.org/wiki/Humaneye>.
- [25] Wikipedia. Runge–kutta methods. http://en.wikipedia.org/wiki/Runge%E2%80%93Kutta_methods.
- [26] Richard P. Wildes. Iris recognition: An emerging biometric technology. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 1997.
- [27] Richard P. Wildes. Iris recognition: An emerging biometric technology. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 1997.