



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Biomedica

**Problematiche di determinazione  
della dimensione della pupilla tramite  
elaborazione di immagini**

**Problems about determination of pupil size  
through image processing**

*Relatore:*  
**Prof. Ennio Gambi**

*Tesi di Laurea di:*  
**Federico Barbarossa**

# Indice

1.Introduzione.....	1
2.Stato dell arte .....	2
3.Algoritmi per la rilevazione della pupilla .....	4
3.1 Algoritmo di Viola-Jones .....	4
3.2 Algoritmo di Canny.....	7
3.3 Trasformata di Hough.....	10
4.Estrazione diametro della pupilla.....	13
4.1 Setup.....	13
4.2 Metodo per lo studio dinamico .....	14
4.2.1 Decompressione del video .....	14
4.2.2 Aggiunta delle cartelle e definizione variabili fondamentali .....	15
4.2.3 Eye Detection e taglio della pupilla.....	16
4.2.4 Inizializzazione del ciclo.....	17
4.2.5 Conversione e binarizzazione.....	18
4.2.6 Canny e Hough.....	18
4.2.7 Circle Blob.....	19
4.2.8 Plot dei grafici.....	19
4.3 Metodo per lo studio statico.....	20
5.Risultati.....	24
5.1 Metodo statico.....	24
5.2 Metodo dinamico.....	25
6.Conclusioni.....	29
7.Bibliografia.....	31

*Per questa tesi si ringraziano il Professore Ennio Gambi, Manola Ricciuti per la disponibilità offertami e il mio collega nonché caro amico Alessio Di Lello con cui ho collaborato durante il lavoro di sperimentazione.*

# 1. Introduzione

Il lavoro che presenterò riguarda uno studio sulla dimensione della pupilla umana e della variazione del suo diametro in condizioni di luce standard artificiale e come conseguenza di stimoli luminosi esterni quali accensione di una torcia.

Sono stati svolti numerosi studi in precedenza sull'occhio umano in particolare sulla pupilla perché essa può fornire molte informazioni utili sul soggetto sia in campo medico che in campo psico-fisico; Un' aumento del diametro della pupilla ad esempio può significare una manifestazione emotiva nel soggetto, uno stato di stress o una presenza di malattie importanti come il diabete.

Lo studio sul diametro pupillare potrebbe avere importanti risvolti anche nell'ingegneria: ad esempio un sensore posto in un autoveicolo potrebbe riuscire a captare il volto e l'occhio del conducente in qualsiasi condizione luminosa rilevando il livello di affaticamento visivo o stanchezza del guidatore che diversi studi hanno dimostrato essere correlati a una drastica diminuzione del diametro della pupilla.

Per questo lavoro di tesi ho fatto delle acquisizioni di foto e video di dieci soggetti nello spettro del visibile e i segnali derivanti da tali dati sono stati elaborati in MATLAB. Lo studio che segue le suddette acquisizioni è suddivisibile in due categorie, uno statico che considera due singole fotografie del volto del soggetto, e uno di tipo dinamico che invece prende in considerazione un video generalmente di 20 secondi con un frame rate di 30 o 60 fps.

Tutti i dati di analisi sono stati ottenuti mediante il supporto di GoPro Hero6 e iPhone7.

Nel caso di analisi statica le immagini che il programma prende come input sono una foto in condizione di scarsa luce ed una in condizione di luce intensa; ciò che è stato fatto è un confronto tra i rispettivi diametri che sono stati misurati sfruttando alcune funzioni Matlab così da poter osservare una variazione evidente della pupilla e un determinato tempo di risposta dell'occhio.

Per quanto riguarda l'analisi dinamica il codice sfrutta la sequenza di frame del video acquisito per fornire dei risultati utili mediante due metodi di misurazioni: Circle Blob e trasformata di Hough. Ciò che si ottiene è un grafico che in questo caso rappresenta l'andamento nel tempo del diametro della pupilla.

Nel Capitolo 2 si andranno a descrivere i precedenti studi che sono stati fatti al riguardo del diametro pupillare e che hanno ispirato questa tesi.

Nel Capitolo 3 inserirò i principali algoritmi utilizzati, spiegando nel dettaglio il loro funzionamento e la loro applicazione nella mia ricerca.

Nel Capitolo 4 spiegherò il codice nel dettaglio soffermandomi sulle parti importanti specialmente sugli algoritmi di Viola-Jones, Canny, Circle Blob e trasformata di Hough.

Nel Capitolo 5 vengono raccolti tutti i risultati ottenuti dalle acquisizioni dei soggetti che si sono sottoposti al test, mostrando tabelle e grafici che permettono un chiaro confronto tra diametri di pupille in diverse condizioni luminose.

Nel Capitolo 6 vengono raccolte le conclusioni di questa tesi.

## 2. Stato dell'arte

In questo paragrafo vengono illustrati i principali studi che sono stati fatti precedentemente riguardo la misurazione del diametro della pupilla che hanno ispirato questa tesi. La variazione del diametro pupillare è indice di molte condizioni fisiologiche umane come ad esempio la stanchezza e il livello di stress [1].

E' stato svolto un esperimento su diversi soggetti i quali si sono sottoposti ad una privazione del sonno: tutti i valori registrati della pupilla sono stati acquisiti in fase di luce e di buio continuamente utilizzando un infrarosso. Lo scopo della ricerca di Yair Morad è quello di fare un confronto tra sensazione soggettiva di stanchezza e l'effettivo riscontro che si ottiene dagli esperimenti sulla pupilla dei volontari. Tutti i risultati ottenuti differiscono significativamente tra prontezza e affaticamento e nonostante ciò, tra la grande disparità di soggetti, si è riusciti a calcolare un rapporto cumulativo di variabilità pupillare (Pupillary Variability Ratio, PVR). Variando questo parametro si riesce ad applicare la stessa misurazione su qualsiasi persona.

Questa analisi o pupillogramma è dunque in grado di produrre una valutazione in tempo reale dello stato di fatica correlata a una condizione soggettiva di effettiva stanchezza.

Un soggetto in condizione di affaticamento tende a presentare una diminuzione netta del diametro della pupilla rispetto che se lo stesso soggetto fosse in uno stato di rilassamento.

Le fluttuazioni spontanee della pupilla possono essere utilizzate anche come base per lo studio di molti parametri vitali umani, come ad esempio la variabilità della frequenza cardiaca (o Heart Rate Variability, HRV) [2]. Per HRV viene inteso il tempo che intercorre tra due picchi R-R in un normale susseguirsi di cicli cardiaci.

Tramite un Eye Tracker remoto, cioè un algoritmo in grado di rilevare l'occhio umano (Viola-Jones) e un algoritmo integro-differenziale per l'identificazione del contorno della pupilla, filtrato per le occlusioni delle palpebre e studiato per l'estrazione di centro e raggio della pupilla, viene stimato

l'HRV dal livello di distribuzione di energia in bassa frequenza (da 0,04 a 0,15 Hz) e bande ad alta frequenza (da 0,15 a 0,4 Hz) dello spettro di potenza delle serie temporali delle fluttuazioni pupillari. Il vantaggio di questo metodo è la non invasività, non servono quindi elettrodi come nel classico approccio medico. La suddetta è un'importante applicazione in campo clinico, poiché tramite questa tecnica si possono tenere sotto controllo pazienti affetti da malattie cardiache o semplicemente monitorare un qualsiasi caso clinico.

Anche nel campo della psicologia può essere utile conoscere come varia il diametro della pupilla perché essa può rilevare in molti casi lo stato emotivo.

Nel 2017 a Nicosia è stato condotto un interessante studio sul comportamento dell'occhio umano di fronte a una situazione in cui occorreva identificare se un soggetto mentiva o meno [3]: ogni qualvolta che uno dei soggetti che si sono sottoposti all'esperimento mentiva, veniva riscontrato un importante rimpicciolimento della pupilla mentre per coloro che invece dicevano la verità la pupilla rimaneva di una grandezza costante.

I ricercatori dello studio sopra citato hanno pre-elaborato le immagini preparandole per la segmentazione che nel loro caso è stata fatta tramite il metodo di Otsu (Nobuyuki Otsu, ricercatore giapponese). Si tratta di un metodo di sogliatura (thresholding) automatico che, partendo da un'immagine in scala di grigi (input) restituisce un'immagine binarizzata (output). Quest'ultima è a sua volta l'input di una trasformata di Hough che calcola il raggio finale (o diametro) della pupilla. E' stato in precedenza affrontato anche ampiamente il problema del rilevamento dell'occhio e di quali siano le migliori condizioni e metodi di acquisizione dell'immagine da studiare.

In questo mio lavoro di tesi ho sfruttato l'algoritmo di Viola-Jones che è largamente utilizzato in ambito, e tutti i dati da me utilizzati sono stati registrati nel campo del visibile ma numerosi studi sono stati svolti in passato al fine di trovare il miglior compromesso tra affidabilità e semplicità di applicazione. Nel 2010 in West Virginia un gruppo di ricercatori ha svolto uno studio sul Multispectral Eye Detection [4], cioè una localizzazione della pupilla di 30 soggetti in 3 diverse bande di frequenza: visibile, multispettrale e ad onde corte infrarosse (Short Wave Infra-Red, SWIR).

Tra i problemi più insidiosi per gli algoritmi con spettro visibile si notano la variazione di livello e natura dell'illuminazione e il fatto che al diminuire di questa, il rapporto segnale-rumore aumenta rapidamente, e quindi l'elaborazione e il riconoscimento automatici diventano complessi o alle volte impossibili. Al fine di superare questi problemi le ricerche si sono spostate nell'uso delle immagini a infrarossi (ad es. intensificato nel vicino infrarosso (NIR), Short Wave IR, Long Wave IR). Dopo una lunga serie di prove e esperimenti si è giunti alla conclusione che i vantaggi apportati dall'infrarosso sono molti, soprattutto per un ambiente notturno; si ottiene infatti un miglior rilevamento di volti in condizioni non ottimali ovviando a problemi legati ad artifici sul volto (come ad esempio il trucco).

Immagini SWIR possono inoltre essere combinate con altre a luce visibile per generare un rilevamento più accurato.

Gli schemi di localizzazione dell'iride però, seppur lavorando bene con immagini di occhi ideali generalmente acquisite usando l'illuminazione a infrarossi vicini (NIR), funzionano male per le immagini degli occhi non ideali che sono state acquisite utilizzando l'illuminazione a lunghezza d'onda visibile (VW). Le immagini oculari non ideali contengono disturbi come illuminazione non uniforme e sfocatura [5]. Farmanullah Jan ha proposto degli algoritmi che garantiscono una localizzazione dell'iride affidabile, sopprimendo i riflessi luminosi e le brusche variazioni di intensità dei colori dell'iride una volta impattati dalla luce. Localizza la potenziale posizione della pupilla usando un operatore Integro-differenziale (IDO) che si basa sulla segmentazione della stessa, contrassegnando un insieme di potenziali pixel che approssimano meglio il centro dell'iride (ROI, maggior regione di interesse). Infine per tracciare e regolarizzare dettagliatamente i contorni utilizza uno schema basato sullo sviluppo in serie di Fourier.

Dei metodi sopra citati ho utilizzato l'algoritmo di Viola-Jones per la fase di Eye Detection del volto dei soggetti studiati, fondamentale per la rilevazione oculare, e in larga parte anche la trasformata di Hough che è stata un passaggio cruciale per il calcolo del diametro della pupilla e le sue rispettive coordinate spaziali all'interno dell'iride.

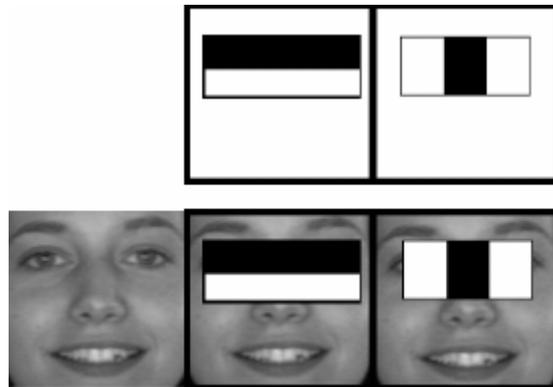
### **3. Algoritmi per la rilevazione della pupilla**

Nel capitolo seguente verranno indicati e spiegati nel dettaglio gli algoritmi che ho utilizzato nella mia tesi. Il primo step è l'identificazione dell'occhio e per questo si è utilizzato l'algoritmo di Viola-Jones, poi per il riconoscimento del contorno della pupilla si è utilizzato il metodo di Canny che a sua volta serve per il terzo step, ovvero la trasformata di Hough; quest'ultima è in grado di calcolare le coordinate della posizione della pupilla per estrarre accuratamente anche la misura del diametro.

#### **3.1 Algoritmo di Viola-Jones**

Il primo algoritmo che tratto è quello di Viola-Jones. Paul Viola e Michael Jones nel 2001 proposero un algoritmo in grado di rilevare gli oggetti in tempo reale. L'obiettivo principale, nel nostro caso, è quello di codificare il contrasto locale in particolari zone facciali. L'algoritmo prevede il calcolo delle feature di Haar, nient'altro che una serie di filtri formati come sommatoria di sotto-parti puramente rettangolari dell'immagine in questione. Ogni immagine in ingresso viene riscalata a dimensione fissa

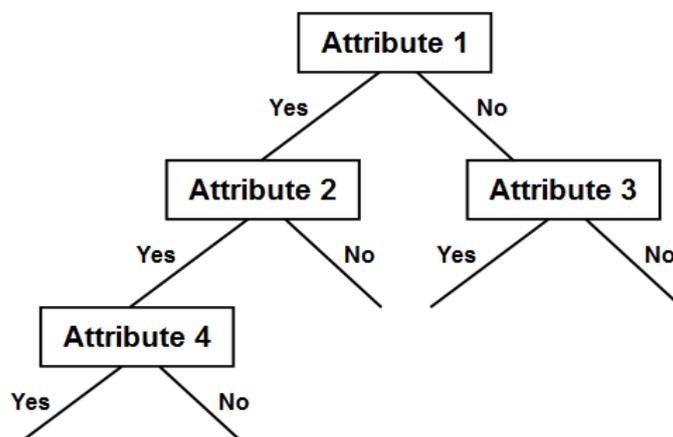
e vengono calcolate tutte le possibili funzionalità. Quest'ultime hanno lo scopo di abbinare le proprietà simili che si trovano nell'immagine, nel nostro caso il volto, riconoscendo quindi caratteristiche comuni dei tratti facciali umani come ad esempio il fatto che la regione degli occhi è più scura delle guance e quella del naso è più luminosa degli occhi, come mostrato in *Figura 3.1*.



*Figura 3.1: rettangoli individuati sulle parti importanti del volto*

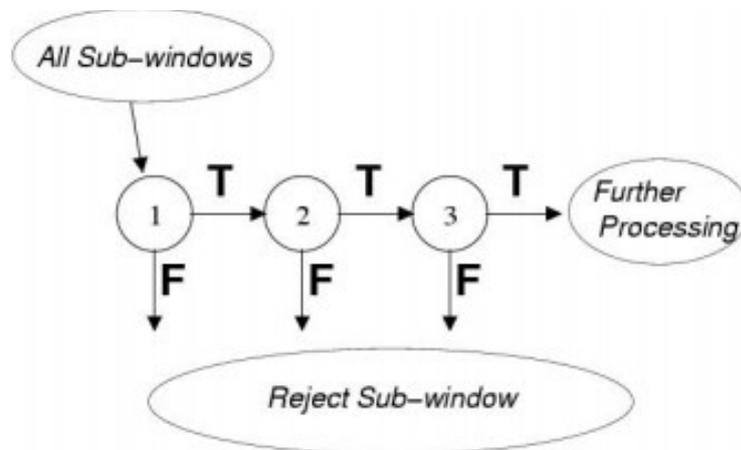
Il numero delle possibili funzionalità può essere molto elevato (talvolta molto maggiore del numero di pixel) quindi oltre al tipo di feature è necessario selezionare la sotto-area di applicazione e indicare quali sono le zone più discriminanti: di questo si occupa l'attività di addestramento tramite Decision Stump, ordinati e potenziati con AdaBoost.

Il Decision Stump, o albero decisionale, è un modello selettivo utilizzato per suddividere sequenzialmente le scelte che l'algoritmo deve prendere. In ingresso si ha una singola funzione di input: l'albero tramite un nodo a doppia diramazione, una volta fornito un valore di soglia, decide quale sotto-blocco scegliere in base al "threshold" inserito precedentemente.



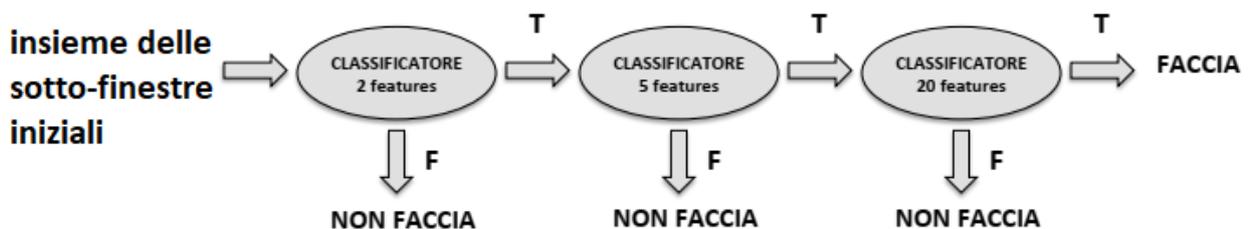
*Figura 3.2: un modello di albero decisionale*

L' Adaboost è un potenziamento di questo modello: esso formula N ipotesi (tramite un algoritmo di accoppiamento, ensemble boosting) a partire da un training set di M esempi (che nel nostro caso è l'insieme dei rettangoli identificati da Haar). Inoltre combina un algoritmo di classificatore debole per formare un classificatore forte. Combinando più classificatori con la selezione del training set iniziale ad ogni iterazione e assegnando il giusto peso alla scelta ultima, si può ottenere un elevato grado di precisione del classificatore finale. L'idea quindi è quella di partire da un classificatore debole per arrivare ad uno forte, cioè che “filtri” ogni scelta per raggiungere accuratamente l'obiettivo desiderato. Questo processo genera quindi dei classificatori a cascata.



**Figura 3.3:** schema generico di una serie di classificatori

Vengono scartate le sotto-finestre facili da identificare (**Figura 3.3**), ogni nodo di questa cascata rappresenta un classificatore forte. Ogni dato attraversa tutti i nodi della cascata. Se l'immagine viene giudicata negativa dal primo classificatore viene scartata immediatamente, altrimenti viene inoltrata a un secondo nodo e così via. Terminato questo processo a cascata l'algoritmo di Viola-Jones rileva dei box nel volto del soggetto riconducibili agli occhi.



**Figura 3.4:** classificatori a cascata per l'identificazione della faccia

### 3.2 Algoritmo di Canny

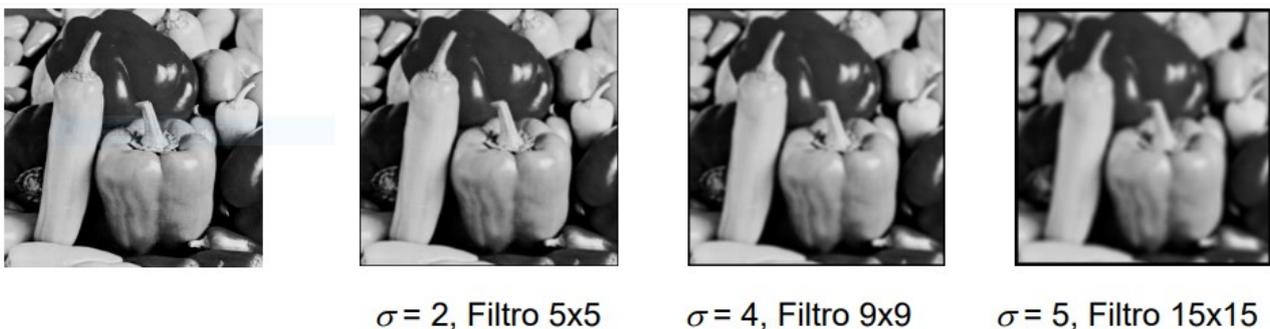
Il secondo algoritmo che è stato utilizzato è quello di Canny. Il suo scopo principale è quello di riconoscere il contorno della pupilla una volta individuata la posizione dell'occhio.

E' stato ideato da Jhon F. Canny nel 1986 che propose l'algoritmo per il rilevamento del bordo di qualsiasi immagine. Questo metodo presenta delle ottime qualità: può vantare un buon riconoscimento, individua e marca quanti più contorni possibile nell'immagine; inoltre ha una distinta localizzazione dei bordi cioè i contorni tracciati sono molto vicini a quelli reali. Sull' algoritmo è implementata una serie di filtri per una valida eliminazione del rumore di cui l'immagine è affetta così da rendere più visibili i contorni utili e eliminando i falsi.

L'approccio dell'algoritmo prevede le seguenti fasi:

1. Smoothing gaussiano dell'immagine.
2. Calcolo del gradiente.
3. Soppressione dei non-massimi.
4. Selezione degli edge significativi mediante isteresi.

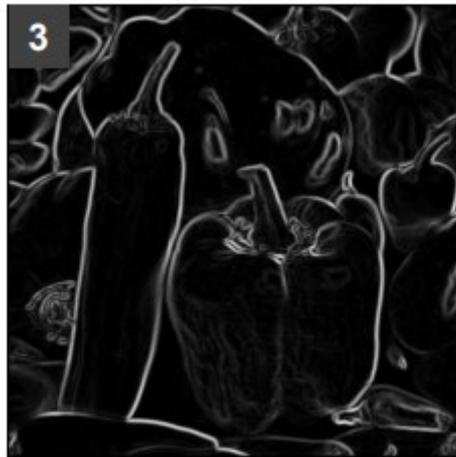
Prima di iniziare l'elaborazione, l'immagine iniziale viene sottoposta a convoluzione con un filtro gaussiano (1). Gli elementi sono pesati secondo una funzione gaussiana. Il parametro  $\sigma$  controlla l'ampiezza della funzione e quindi l'entità della regolarizzazione e del filtraggio. Ciò che si ottiene è un'immagine con una sfocatura che aumenta all'aumentare del parametro  $\sigma$  ma in cui nessun pixel è affetto da disturbi di livello significativo. Generalmente si applica un'approssimazione a valori interi per una maggiore efficienza e semplicità.



**Figura 3.5:** Lo smoothing gaussiano lavora con un parametro  $\sigma$ : si cerca sempre un compromesso tra non eccessiva sfocatura e dimensione della matrice.

La seconda fase prevede il calcolo del gradiente per la luminosità dell'immagine (2).

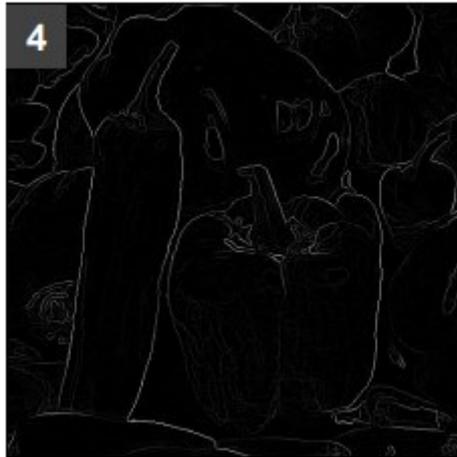
Dopo lo smoothing è necessario conoscere per ciascun pixel la direzione a cui corrisponde il massimo gradiente di luminosità in ogni punto dell'immagine; per fare ciò l'algoritmo usa quattro filtri differenti per individuare i contorni orizzontale, verticale e diagonali dell'immagine, a cui è stato precedentemente applicato il filtro gaussiano. Per ciascun pixel risultante viene assunta come valida la direzione relativa al filtro che dà il valore maggiore. In questo modo l'immagine non perde di luminanza.



*Figura 3.6: immagine derivante dal calcolo del gradiente*

La terza fase prevede la soppressione dei non-massimi (3).

Il valore dell'intensità luminosa in ciascun punto dell'immagine è quindi fornita dalla mappa dei gradienti precedentemente ottenuta. Una forte intensità indica una forte probabilità della presenza di un contorno. Tuttavia, questa indicazione non è sufficiente a decidere se un punto corrisponde oppure no ad un contorno. Solo i punti corrispondenti a dei massimi locali sono considerati come appartenenti ad un contorno, e saranno presi in considerazione dai successivi step di elaborazione. Un massimo locale si ha nei punti in cui la derivata del gradiente si annulla. Un approccio di calcolo possibile potrebbe essere quello di analizzare l'intorno 3x3 di ogni pixel, eliminando i pixel che non rispettano la condizione di massimo locale lungo la direzione del gradiente (ortogonale al contorno).



*Figura 3.7: è avvenuta la soppressione dei non massimi*

La quarta fase invece è la selezione finale dei bordi (4).

Al fine di selezionare solo gli edge significativi si utilizza il concetto di isteresi: vengono impiegate due soglie  $T1$  e  $T2$ , con  $T1 > T2$  per scremare ulteriormente i massimi locali ottenuti nella fase precedente: Sono inizialmente considerati validi solo i pixel in cui il modulo del gradiente è superiore a  $T1$ . I pixel il cui modulo è inferiore a  $T1$  ma superiore a  $T2$  sono considerati validi solo se adiacenti a pixel validi.



*Figura 3.8: sono stati selezionati solo i bordi di interesse*

Vista in successione la sequenza di step risulta come in *Figura 3.9*.



*Figura 3.9: intero algoritmo di Canny visto in successione*

### 3.3 Trasformata di Hough

Dopo il rilevamento dell'occhio e la localizzazione del contorno della pupilla, si è utilizzata la trasformata di Hough (HT) per il calcolo del diametro di quest'ultima.

E' una tecnica che permette il riconoscimento di segmenti, curve e forme prestabilite, e si basa sulla trasformazione di tutti i punti costituenti una immagine, in punti di un nuovo spazio (spazio dei parametri). Inizialmente la tecnica era stata ideata per il solo riconoscimento di segmenti rettilinei (fine anni '60), mentre al giorno d'oggi è implementata anche per il riconoscimento di figure più complesse come circonferenze, parabole e poligoni. La HT trasforma il problema della ricerca di una curva nella semplice ricerca di massimi o di valori di picco; si basa sul concetto che la forma cercata può essere espressa tramite una funzione nota che fa uso di un insieme di parametri.

Alla fine saranno i massimi di questa nuova funzione (parametrica), ovvero i punti nello spazio dei parametri che hanno accumulato il maggior numero di "voti", a rappresentare le curve che hanno probabilità elevata di essere presenti nell'immagine di partenza.

Si sfrutta questa tecnica perché si può definire sempre una qualsiasi curva piana in forma analitica tramite un insieme di parametri. Una equazione che lega i parametri alle coordinate cartesiane è la seguente:

$$f((x, y), (A_1, A_2, \dots, A_n)) = 0$$

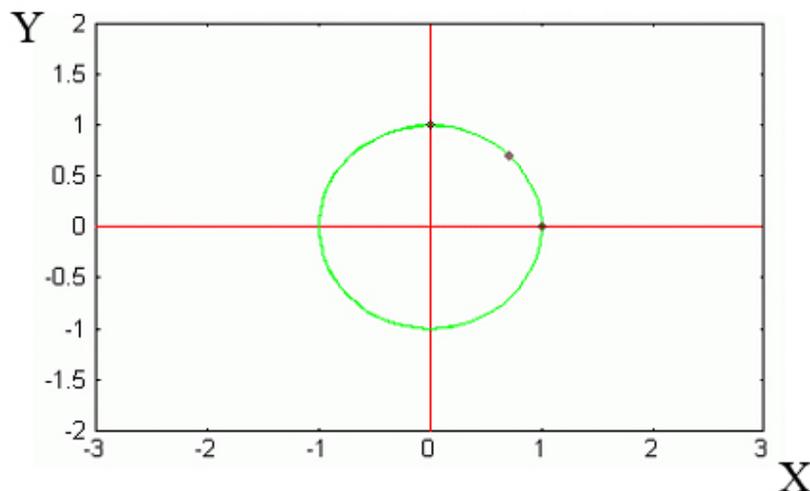
dove  $(x, y)$  è un punto della curva nello spazio immagine (SI) mentre  $(A_1, A_2, \dots, A_n)$  è una n-upla di valori che individuano un punto nello spazio dei parametri (SP); il viceversa è che un punto nello spazio dei parametri individua in modo univoco una curva analitica.

I punti nello SI appartenenti ad una stessa curva generano delle superfici che si intersecano in uno stesso punto in SP.

Per chiarire il concetto applichiamo la trasformata di Hough ad una circonferenza.

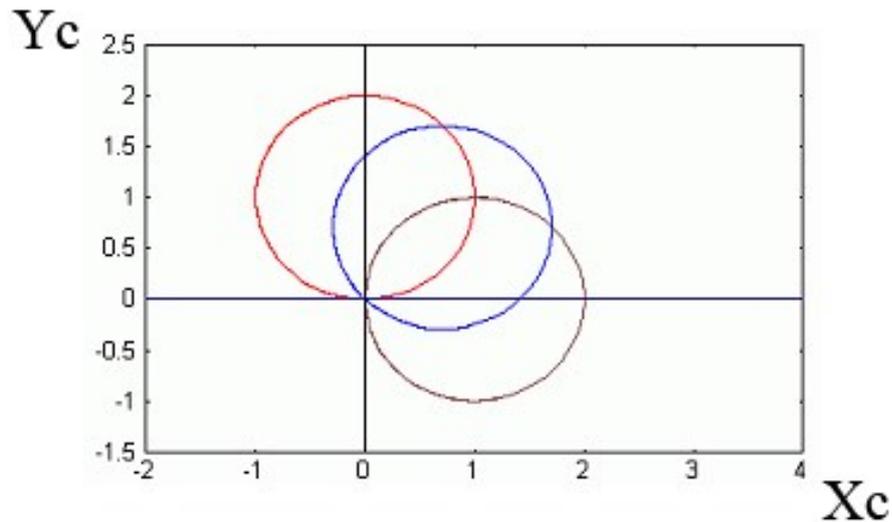
Partiamo dal caso in cui conosciamo il raggio del cerchio che vogliamo studiare: conoscendo l'equazione che descrive una circonferenza, cioè  $(y - y_c)^2 + (x - x_c)^2 - r^2 = 0$

ricaviamo i parametri noti e cioè le coordinate x e y del centro  $(x_c, y_c)$  e il raggio ( $r$ ) Lo spazio dei parametri è bidimensionale e la curva generata ad ogni punto nello spazio immagine è lo stesso un cerchio.



**Figura 3.10:** lo spazio immagine è una circonferenza di raggio noto (unitario in questo caso e coordinate del centro conosciute).

Lo spazio dei parametri è generato dalle coordinate del centro della circonferenza.

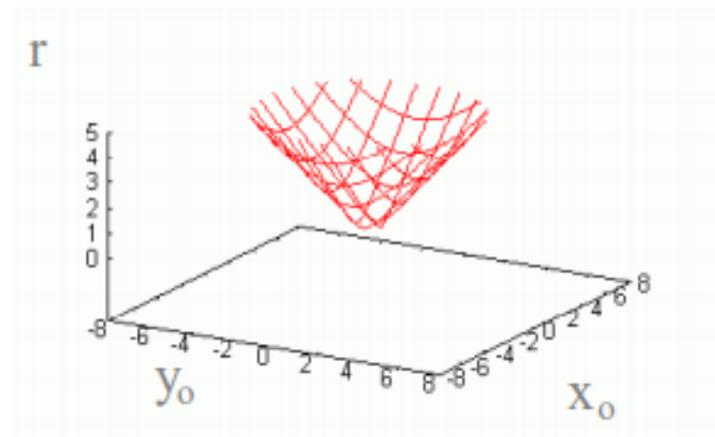


**Figura 3.11:** lo spazio dei parametri è una serie di cerchi che si intersecano tutti nel centro teorico.

In genere però la trasformata di Hough si utilizza per cercare il raggio di una circonferenza che solitamente è incognito ed è l'obiettivo principale dell'applicazione del metodo. Nella mia ricerca ho infatti sfruttato tale algoritmo per poter ricavare, oltre che le coordinate cartesiane della posizione, anche il raggio della pupilla stessa. Definendo sperimentalmente un range teorico di raggi che l'algoritmo può utilizzare come soglia ho trovato il diametro della pupilla di ogni soggetto che ho analizzato. Se il raggio della circonferenza può variare però ci troviamo di fronte a una situazione in cui abbiamo 3 incognite, poiché alle due coordinate si aggiunge una terza che è il raggio stesso. Quindi l'equazione a cui si fa riferimento ora è la seguente:

$$f((x, y), (x_c, y_c), r) = (y - y_c)^2 + (x - x_c)^2 - r^2 = 0$$

In questo caso lo SP è tridimensionale e la curva generata è un cono come mostrato in **Figura 3.12**

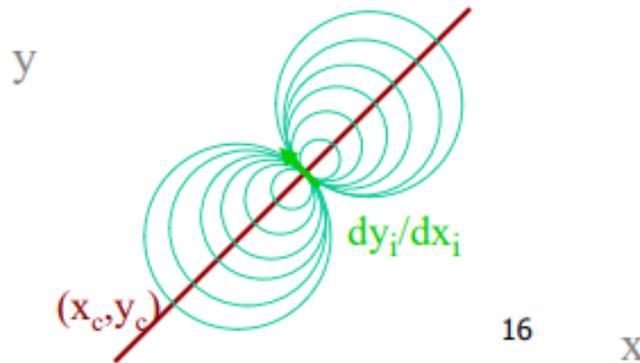


**Figura 3.12**

Una volta trovata la tangente nel punto  $(\frac{\partial y_i}{\partial x_i})$  la compatibilità è ridotta ad una retta:

$$y_c = -\frac{1}{m_i x_c} + (y_i - m_i x_i)$$

conoscendo la curvatura nel punto appartenente al raggio R la compatibilità è ridotta ad un singolo punto  $(x_c, y_c)$  come mostrato in **Figura 3.13**.



**Figura 3.13**

## 4. Estrazione diametro della pupilla

Il paragrafo che segue descrive il processo di estrazione del diametro della pupilla nei soggetti studiati. Vengono descritti setup, metodi e funzioni utilizzate. Per ogni funzione verrà riportato il rispettivo codice e verranno spiegati dettagliatamente i passaggi fondamentali che hanno portato a dei risultati soddisfacenti. Il presente capitolo darà particolare attenzione all'analisi dinamica nel tempo più che a quella statica poiché di maggior interesse in molte applicazioni pratiche.

### 4.1 Setup

Per questo lavoro sono stati presi in esame 10 soggetti che si sono volontariamente sottoposti all'esperimento. Si sono fatte delle acquisizioni foto e video del volto di ciascuno. Tutti i dati utilizzati sono ottenuti mediante supporto di una camera GoPro Hero 6 e iPhone7. I video sono stati registrati in risoluzione fullHD (1920x1080); si è cercato di mantenere una qualità video elevata così da essere più precisi nella stima finale: più pixel abbiamo in ciascun frame più l'analisi risulterà precisa.

Sfruttando le potenzialità di GoPro abbiamo registrato video sia a 30 che 60 frame al secondo (frame per second, fps) ovvero numero di fotogrammi che appaiono in un secondo di video. Generalmente questi ultimi hanno durata di circa 20 secondi per cui lavoriamo con un minimo di 600 frame fino ad un massimo di 1200. E' stato utilizzato come ambiente di programmazione Matlab il quale ci ha permesso un'eccellente esecuzione dei dati viste le ingenti quantità di funzioni a nostra disposizione.

## 4.2 Metodo per lo studio dinamico

Questo paragrafo spiega quali sono stati i passaggi chiave che hanno portato al risultato finale riguardo l'analisi dinamica della pupilla. Si possono identificare 8 macro-parti: Una decompressione iniziale del video, una definizione delle variabili principali e un corretto richiamo alle directory, l'algoritmo di Viola-Jones per l'identificazione dell'occhio, un'inizializzazione dell'algoritmo che analizza frame per frame seguita dalla conversione e binarizzazione dell'immagine e infine l'algoritmo di Canny per il tracciamento dei contorni della pupilla e la trasformata di Hough per il calcolo del suo diametro. Inoltre è stato aggiunto un ulteriore metodo, il Circle Blob. A concludere c'è il plot dei grafici disegnati e il loro relativo filtraggio.

### 4.2.1 Decompressione del video

La prima fase prevede una decompressione del video senza perdita alcuna di informazioni. Dal video vengono generate 600 o 1200 immagini a seconda che l'acquisizione è avvenuta a 30 o 60 frame per second. Per questo è importante quindi specificare il livello di fps a cui è stato girato il video.

Il codice verifica l'esistenza di una directory di output e qualora mancasse la crea automaticamente; questa cartella, da me chiamata "bmpdata", contiene tutti i fotogrammi che poi successivamente, come vedremo, saranno analizzati uno ad uno grazie ad un ciclo for. Dopo aver inserito la cartella di lavoro e avervi assegnato il nome corretto il programma parte e ciò che si ottiene è il video decompresso in immagini, come volevamo.

```
AviDataFolder = 'Video'; % cartella di input
BmpDataFolder = 'bmpdata\Subject_Name'; % cartella di output
BmpDataPath = strcat(BmpDataFolder, '\Image_RGB%d.bmp');
AviDataPath = strcat(AviDataFolder, '\Subject_Name.MP4'); % tutti i video sono MP4
fps=60; % IMPORTANTE SPECIFICARE IL NUMERO DI FPS DI ACQUISIZIONE
% Verifica se la directory di output esiste e la crea
if (exist(BmpDataFolder, 'dir') == 0)
    mkdir(BmpDataFolder);
end
CommandString = sprintf('ffmpeg -i %s -f image2 %s', AviDataPath, BmpDataPath);
status = dos(CommandString);
```

## 4.2.2 Aggiunta cartelle e definizione variabili fondamentali

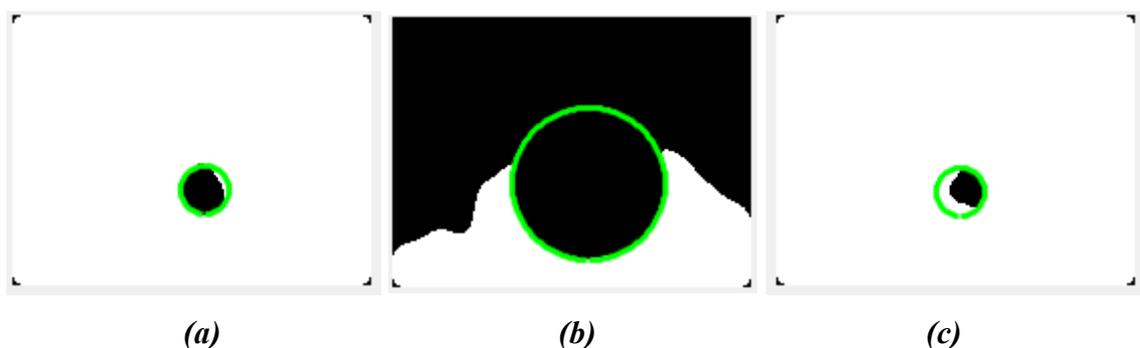
Giunti a questo punto inizia la vera e propria fase di elaborazione.

Dopo aver aggiunto le cartelle necessarie e aver inserito il nome del file video di interesse vanno esplicitati alcuni parametri fondamentali tra cui il frame iniziale da cui partire e l'ultimo dove terminare lo scorrimento (rispettivamente StartIndex e StopIndex); la possibilità di scegliere un frame è un grande vantaggio qualora alcune parti iniziali o finali del video fossero compromesse o comunque non adatte al lavoro (caso di occhi chiusi o sistemazione iniziale della videocamera).

Si è utilizzata una variabile "radii" per dare un range di lavoro alla trasformata di Hough: verranno considerati solamente i valori del raggio contenuti nell'intervallo definito.

Sono stati inseriti due parametri per la calibrazione che tengono conto del posizionamento della videocamera rispetto all'occhio del soggetto: "thr\_eqd" e "thr\_hough" relativi rispettivamente al Circle Blob e alla trasformata di Hough, mantenendo un rapporto coerente tra i due risultati. Questi fattori insieme al "calibrationFactor", che permette il passaggio da pixel a millimetri, vanno trovati empiricamente poiché variano da soggetto a soggetto.

Fondamentale è stato definire dei livelli di binarizzazione: queste variabili servono ad avere un buon contrasto tra la pupilla e l'iride nell'immagine binarizzata e anch'essi vanno variati da soggetto a soggetto in presenza di diverse condizioni luminose o a seconda se ci troviamo a lavorare con un occhio dall'iride chiara (per cui necessito un maggior contrasto) o scura. Sono stati chiamati "normal" e "reduced": il primo è il livello di binarizzazione relativo a una situazione di scarsa luce, il secondo è relativo ad una condizione di luce diretta sull'occhio per cui generalmente il livello va aumentato.



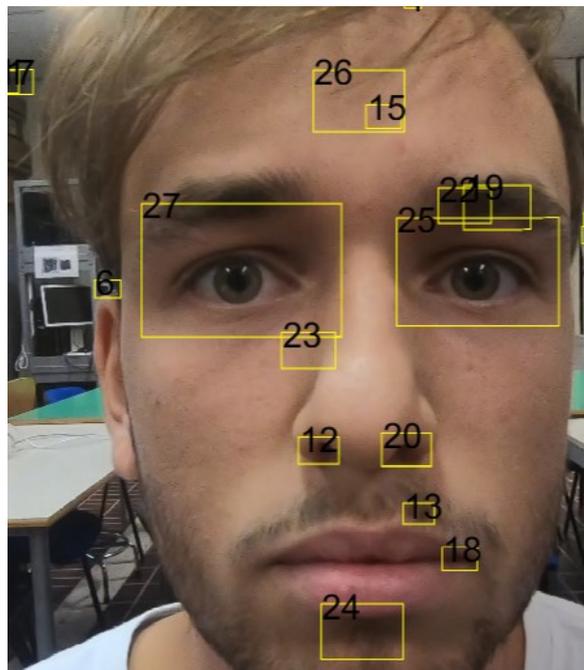
**Figura 4.1**

Si può notare dalla **Figura 4.1** come un livello di binarizzazione errato influisce sulla rilevazione del contorno: il primo (a) è quello corretto (0.09), il secondo (b) è troppo elevato dunque vi è un contrasto eccessivo (0.22) mentre il terzo (c) è troppo basso e quindi il cerchio tracciato non corrisponde appieno con la pupilla (0.07).

### 4.2.3 Eye Detection e taglio della pupilla

A questo punto viene caricata la prima immagine precedentemente decompressa da cui inizia lo scorrimento del codice. Tramite la funzione `“vision.CascadeObjectDetector”` viene applicato l’algoritmo di Viola-Jones per cui si evidenziano nel volto i box contenenti punti di maggior interesse.

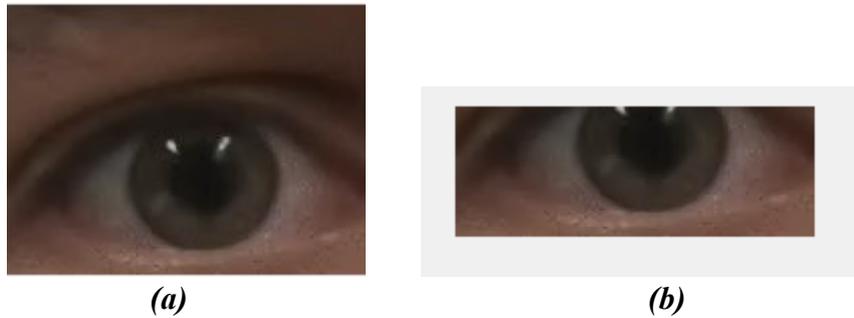
La funzione utilizzata Eyedetect è in grado di rilevare una grande varietà di oggetti all’interno dell’immagine; starà poi all’utente selezionare manualmente il box di interesse mediante un numero associato che nel nostro caso è l’occhio sinistro (LeftEye). Si veda la **Figura 4.2**.



**Figura 4.2:** E' stato scelto il box 27, occhio sinistro.

Una volta scelto il box, su di esso possiamo fare diverse modifiche: si può sceglierne l’altezza e la larghezza, effettuare un taglio della pupilla anch’esso in altezza, larghezza e fare uno shift del ritaglio nella direzione che più ci interessa. Questo pezzo di codice è fondamentale quando abbiamo dei

disturbi irremovibili tramite il filtraggio e grazie a un semplice spostamento del contorno del box o un suo rimpicciolimento possiamo eliminare parti di immagine inutilizzabili per il continuo. Il box viene scelto solamente una volta per la prima immagine caricata, il codice successivamente considera anche per le altre immagini il riquadro scelto ma in maniera automatica.

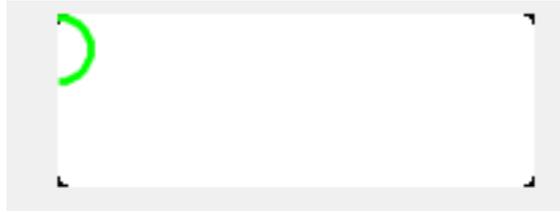


*Figura 4.3: La prima immagine (a) mostra un corretto taglio dell'occhio, la seconda (b) esplica un eccessivo "cut" dell'altezza del box*

#### 4.2.4 Inizializzazione del ciclo

In precedenza sono stati introdotti due livelli di binarizzazione (normal e reduced) ognuno per una specifica condizione di luce. Al calcolatore è stato detto di prendere il "normal" qualora il frame in analisi si trovi in condizione di scarsa luce mentre di scegliere il "reduced" non appena la torcia viene accesa (frameLuce) e subito prima che essa si rispegna per poi ristabilire una condizione di bassa illuminazione.

Il secondo metodo invece seppur molto simile all'altro, risulta più efficace a ridosso dei frame in cui vi è un repentino cambio di illuminazione e impedisce all'algorithm che rileva il contorno di andare fuori scala e scomparire dal box come in **Figura 4.4**. Esso sfrutta dei valori di soglia calcolati empiricamente che rendono più stabile e molto meno oscillante il cerchio tracciato.



*Figura 4.4: il cerchio tracciato va fuori dal box di rilevazione al momento del cambio di illuminazione*

## 4.2.5 Conversione e binarizzazione

Per poter procedere oltre l'immagine deve essere convertita in scala di grigi e binarizzata.

Si è utilizzato la funzione `rgb2gray` per permettere il passaggio da input a tre canali formati dai colori Rosso (Red) Verde (Green) e Blu (Blue) ad un output in scala di grigi. Il modello RGB è di tipo additivo: la combinazione di questi tre canali mette a disposizione molti altri colori, la somma dei tre costituisce il bianco mentre la loro totale assenza genera il nero. La scala di grigi (greyscale) invece rappresenta una gamma di colori, per l'appunto grigi, che vanno dal bianco al nero.

Durante tale conversione non vi è alcuna perdita di luminosità.

E' stato utilizzato un filtro di tipo mediano; il suo scopo è quello di eliminare il riflesso sull'occhio da un eventuale fonte luminosa diretta sulla pupilla. Senza il filtro si otterrebbe un'immagine affetta da disturbo: sulla pupilla si presenterebbe come una "macchia" bianca troppo accentuata dovuta appunto al riflesso. Il grado di filtraggio è modificabile in qualsiasi momento.

Una volta convertita l'immagine va binarizzata in modo da poter separare la pupilla dall'iride sullo sfondo con un contrasto più accentuato possibile tra le due zone.

La funzione Matlab che si utilizza per questo processo è "imbinarize".

Questa funzione prende in ingresso la variabile "level" che avevamo definito precedentemente come livello di binarizzazione.

## 4.2.6 Canny e Hough

A questo punto si frutta l'algoritmo di Canny per la rilevazione del contorno della pupilla. Tramite la funzione "edge" si è in grado di rilevare i bordi dell'immagine. La funzione ha come input l'immagine binarizzata e il metodo scelto che nel nostro caso è appunto Canny. In uscita fornisce sempre

l'immagine binarizzata della stessa dimensione presentando 1 dove vengono rilevati i contorni e 0 altrove.

```
circle = edge(ap, 'canny');
```

La nuova variabile `circle` è ora l'input di una seconda funzione che è quella che fa riferimento alla trasformata di Hough. Essa prende l'immagine binaria e un vettore ipotetico dei raggi restituendo il raggio dei cerchi rilevati. Occorre per cui definire un intervallo entro cui la funzione calcola il raggio finale: ciò è espresso dalla variabile "radii" precedentemente esplicitata.

In uscita ora abbiamo un' array vettoriale chiamato "peaks" che contiene le coordinate x e y del centro del cerchio rilevato e la misura del raggio espressa in pixel.

## 4.2.7 Circle Blob

Parallelamente alla trasformata di Hough è stato implementato un nuovo metodo che ha portato a dei risultati simili e si è rilevato anch'esso affidabile. Si tratta del metodo del Circle Blob. E' un metodo alternativo di estrazione del diametro dalla pupilla: si differenzia dal precedente poiché in questo caso il diametro viene calcolato partendo dalla conoscenza dell'area della "macchia" (blob per l'appunto) che viene rilevata come oggetto più largo e rilevante ovviamente corrispondente con la pupilla stessa. Si è creato una variabile, chiamata "numberOfBlobs", che sta a rappresentare il numero di macchie rilevate nell'immagine che nel nostro caso corrisponde ad una sola ovvero quella di interesse.

Una volta trovato il blob ne viene calcolata l'area (`blobArea`), il perimetro (`blobPerimeter`), il centroide della figura geometrica (`blobCentroid`) e infine mediante una formula inversa anche il diametro (`blobECD`). Più semplicemente si sarebbe arrivati allo stesso risultato applicando la funzione secondaria "regionprops".

## 4.2.8 Plot dei grafici

Ora si vanno a creare dei grafici che rappresentano l'andamento del diametro della pupilla nel tempo. Vengono disegnati 4 grafici, due relativi al metodo classico di Hough e due relativi al Circle Blob. Ciascuno di essi è stato graficato sia in millimetri che in pixel. Il passaggio da uno all'altro è stato reso possibile grazie ai fattori di calibrazione che erano stati dichiarati nella parte iniziale del codice. Sono stati inseriti dei filtri ("smooth" e "medfilt1") per eliminare l'eventuale presenza di picchi indesiderati sul grafico finale dovuti alla chiusura dell'occhio o al cambio di illuminazione.

E' stato utilizzato l'involuppo per avere una curva continua e ben definita evitando un grafico ad "istogramma".

### 4.3 Metodo per lo studio statico

Questo paragrafo spiega lo studio statico che è stato svolto sui soggetti presi in esame. A differenza di quello di dinamico vengono analizzate delle immagini e non un video.

Le fotografie sono state scattate mediante GoPro Hero6. Per ognuno degli 11 soggetti sono state fatte due foto al volto, una in condizione di luce standard e un'altra con illuminazione diretta. Manualmente è stata ritagliata un'area del volto corrispondente all'occhio, generalmente il sinistro così da avere una standardizzazione per ognuno dei casi.



(a)



(b)

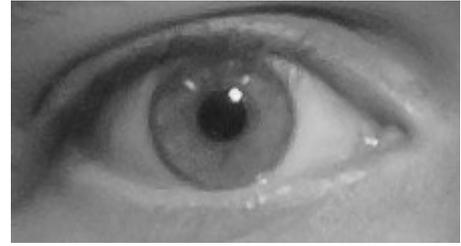
**Figura 4.5:** occhio in luce (a) e in ombra (b)

L'obiettivo è quello di studiare il comportamento dell'occhio quando esso è sottoposto ad una forte illuminazione. Si è notato che in condizione di luce la pupilla tende a restringersi impedendo il passaggio eccessivo di luce mentre quando si ritorna ad una condizione standard la pupilla ritorna ad una condizione normale riallargandosi così da permettere il passaggio di un maggior fascio luminoso. Tale ipotesi è stata avvalorata e riscontrata dai risultati ottenuti in Matlab: è stato scritto un codice che sfrutta alcune funzioni basilari dell'ambiente di programmazione e si è arrivati ad un risultato soddisfacente.

In questa fase l'immagine va convertita in scala di grigi (rgb2gray) e filtrata per ridurre i riflessi pupillari, come in **Figura 4.6**.



*(a)*



*(b)*



*(c)*

*Figura 4.6: Immagine iniziale, in questo caso in condizione di luce (a), immagine ottenuta da conversione in scala di grigi (b) e immagine ottenuta dopo l'inserimento del filtro mediano (c)*

Viene inserito il livello di binarizzazione che è specifico per ogni soggetto e va calcolato empiricamente.

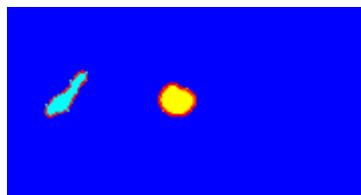


*Figura 4.7: immagine dopo la binarizzazione*

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1

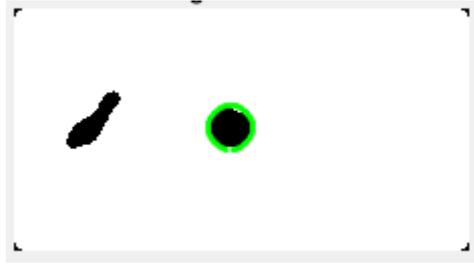
**Figura 4.8:** La matrice mostra l'immagine binarizzata in forma matriciale, la presenza degli 0 indica la presenza della pupilla, gli 1 indicano il bianco cioè l'assenza.

Grazie alla funzione “label2rgb” la matrice binaria viene convertita in un'immagine RGB così da poter vedere quali sono gli oggetti effettivamente estratti e tracciarne i contorni. Il risultato è mostrato in **Figura 4.9**.



**Figura 4.9:** Immagine convertita da scala di grigi a colori RGB

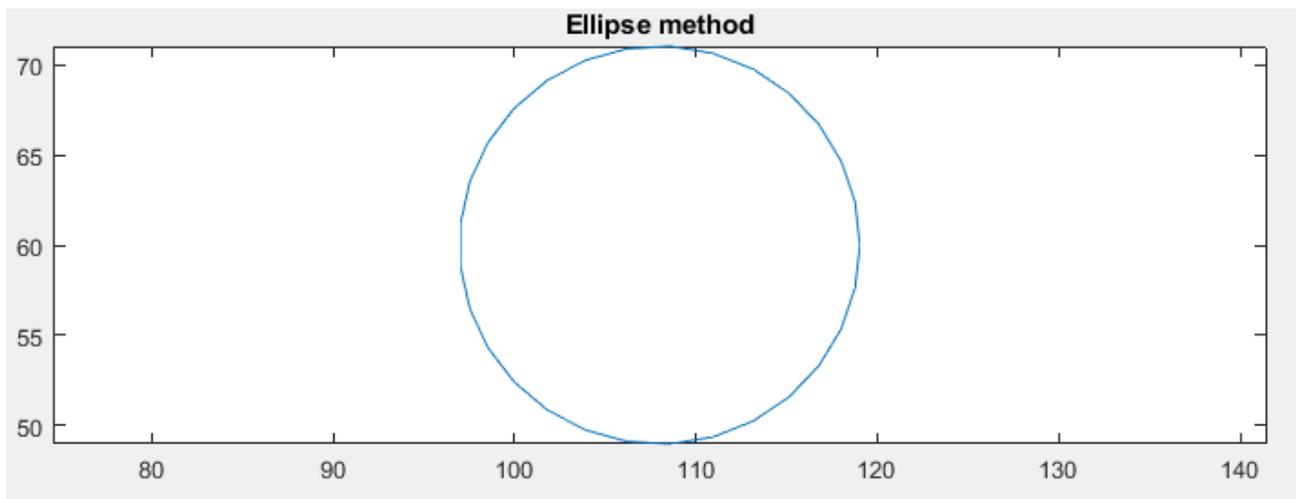
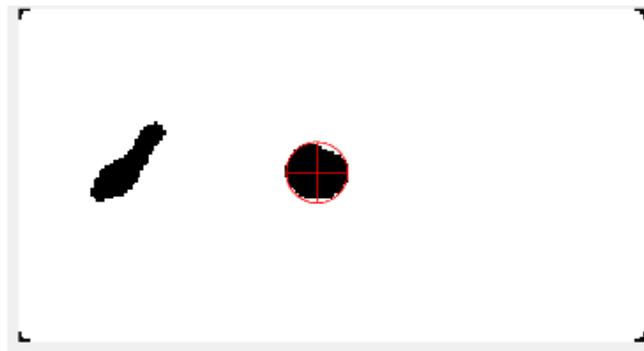
Come si può notare dalla figura, nell'immagine vengono rilevate due macchie, una dalla forma quasi circolare e l'altra di una forma casuale. Quest'ultima è dovuta alla presenza di una zona in ombra dell'occhio e dunque non va tenuta in considerazione. Il compito di “scegliere” quella corretta e tracciarne i contorni è affidato all'algorithmo di Canny che segue. La trasformata di Hough, come già spiegato ampiamente nel capitolo sull'analisi dinamica, ne estrae il diametro.



*Figura 4.10: E' stato rilevato il contorno corretto della pupilla*

Il diametro della pupilla può essere calcolato sfruttando l'equazione caratteristica di un ellissoide, tale metodo è detto metodo dell'ellisse.

Due funzioni scelgono il miglior ellisse per l'insieme di punti dati in ingresso, di conseguenza vengono calcolati i parametri fondamentali e disegnati come in *Figura 4.11*.



*Figura 4.11: viene tracciato l'ellisse corrispondente con coordinate*

Successivamente viene calcolato il raggio che corrisponde alla media dei due assi dell'ellisse ed in seguito; viene poi applicata un'equazione per ricavare il diametro espresso in millimetri che sfrutta il

fattore di calibrazione. Dalla misura degli assi dell'ellisse si nota che i loro moduli corrispondono e sono uguali al valore del diametro ottenuto mediante Hough. Il valore finale è una media del diametro trovato con la trasformata di Hough e quello trovato dall'ellisse corrispondente.

## **5. Risultati**

### **5.1 Metodo statico**

Il seguente paragrafo riporta i risultati ottenuti per il metodo statico. E' stata costruita una tabella contenente i dati principali di 8 soggetti che si sono sottoposti all'esperimento. Per ognuno di essi viene riportata la condizione in luce normale e in illuminazione diretta, rispettivamente indicati con la lettera D (Dark) e L (Light). Viene riportato inoltre il diametro in pixel e in millimetri calcolato mediante trasformata di Hough e il metodo dell'ellisse. E' presente anche il livello di binarizzazione: esso cambia da soggetto a soggetto in base al colore dell'iride e all'esposizione luminosa della pupilla; è per questo che tale valore va modificato anche quando si accende la torcia per ognuno dei soggetti. Generalmente infatti si nota un innalzamento del livello di binarizzazione in fase "light" rispetto che in "dark" appunto per andare ad aumentare il contrasto della pupilla sull'iride.

Dalla tabella è avvalorata l'ipotesi che la pupilla esposta alla luce si restringe diminuendo il diametro notevolmente con uno scarto che varia da 0.5 a 2.5 millimetri.

RISULTATI METODO STATICO						
ID	level	D. trasf. Hough (pixel)	Raggio Hough (Pixel)	D.Metodo Ellisse (mm)	Raggio Metodo Ellisse (pixel)	
SO1D	0.10	32	16	8.5	15.95	
SO1L	0.19	22	11	5.9	11.03	
SO2D	0.07	28	14	7.5	14.03	
SO2L	0.12	22	11	5.9	11.04	
SO3D	0.078	30	15	8.0	15.00	
SO3L	0.14	20	10	5.4	10.12	
SO4D	0.08	22	11	5.9	11.03	
SO4L	0.19	20	10	5.4	10.12	
SO5D	0.11	28	14	7.5	14.02	
SO5L	0.16	22	11	5.9	11.03	
SO6D	0.22	24	12	6.4	12.04	
SO6L	0.25	20	10	5.4	10.12	
SO7D	0.18	24	12	6.4	12.04	
SO7L	0.16	20	10	5.4	10.12	
SO8D	0.05	32	16	8.5	15.95	
SO8L	0.075	20	10	5.3	10.12	

Tabella 5.1

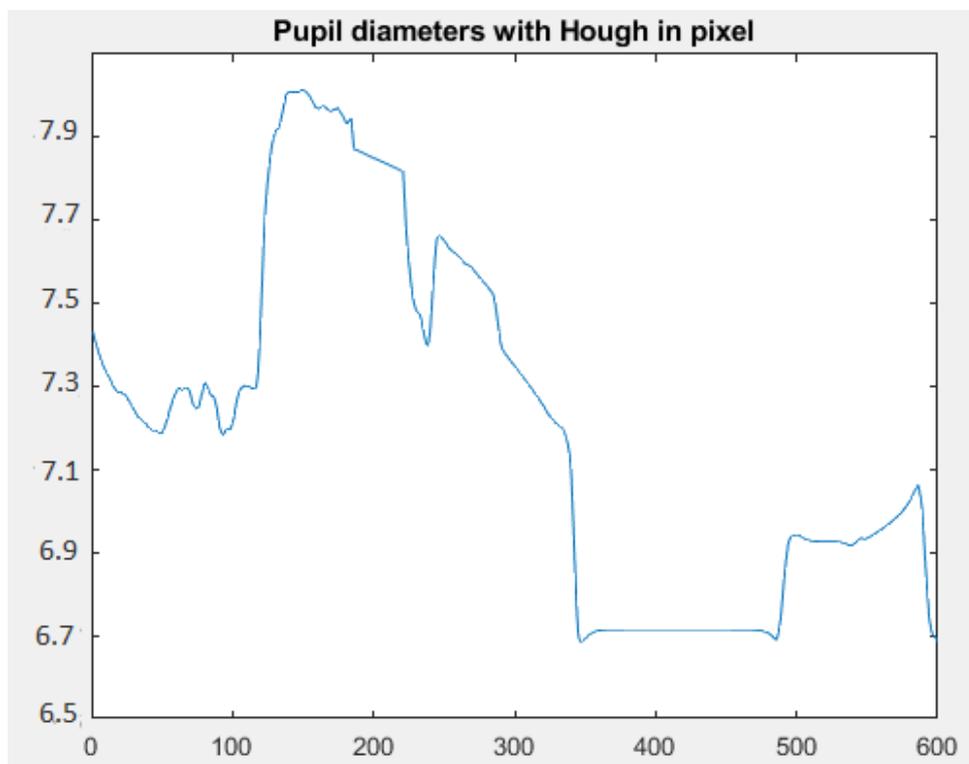
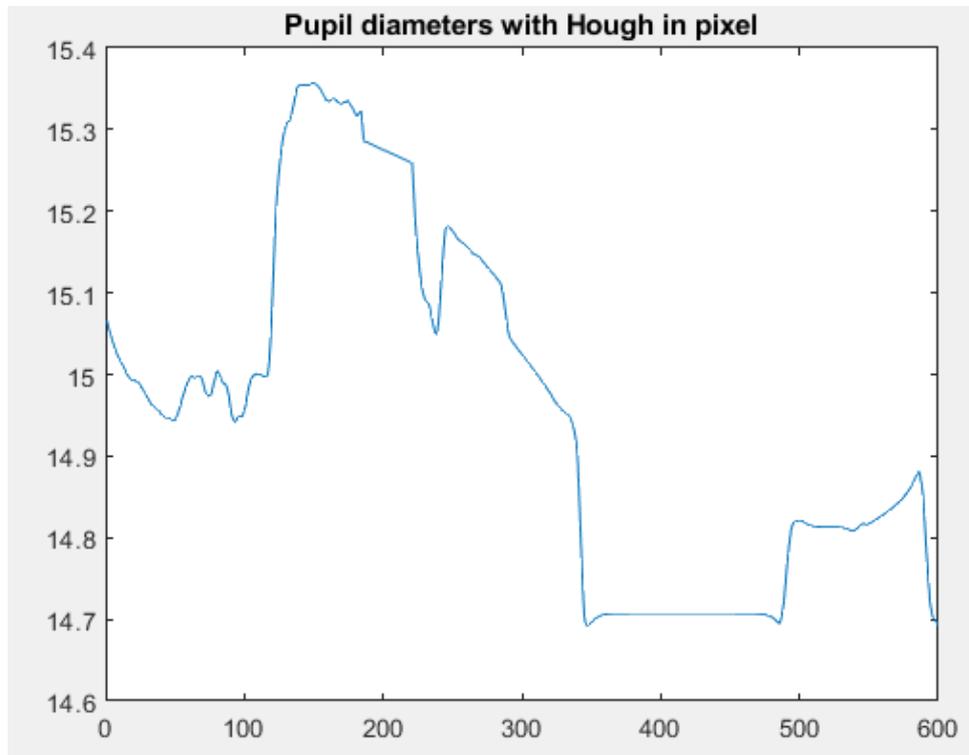
## 5.2 Metodo dinamico

In questo paragrafo vengono riportati i risultati del metodo dinamico. Nella tabella 4.2 sono stati inseriti tutti i valori derivanti da 4 soggetti diversi. Sono presenti i due livelli di binarizzazione (normal e reduced) per le condizioni di luce standard e illuminazione, i valori del diametro pupillare calcolato con Hough e Circle Blob sia in millimetri che in pixel. La voce FrameLuce indica il fotogramma a cui corrisponde l'accensione della torcia.

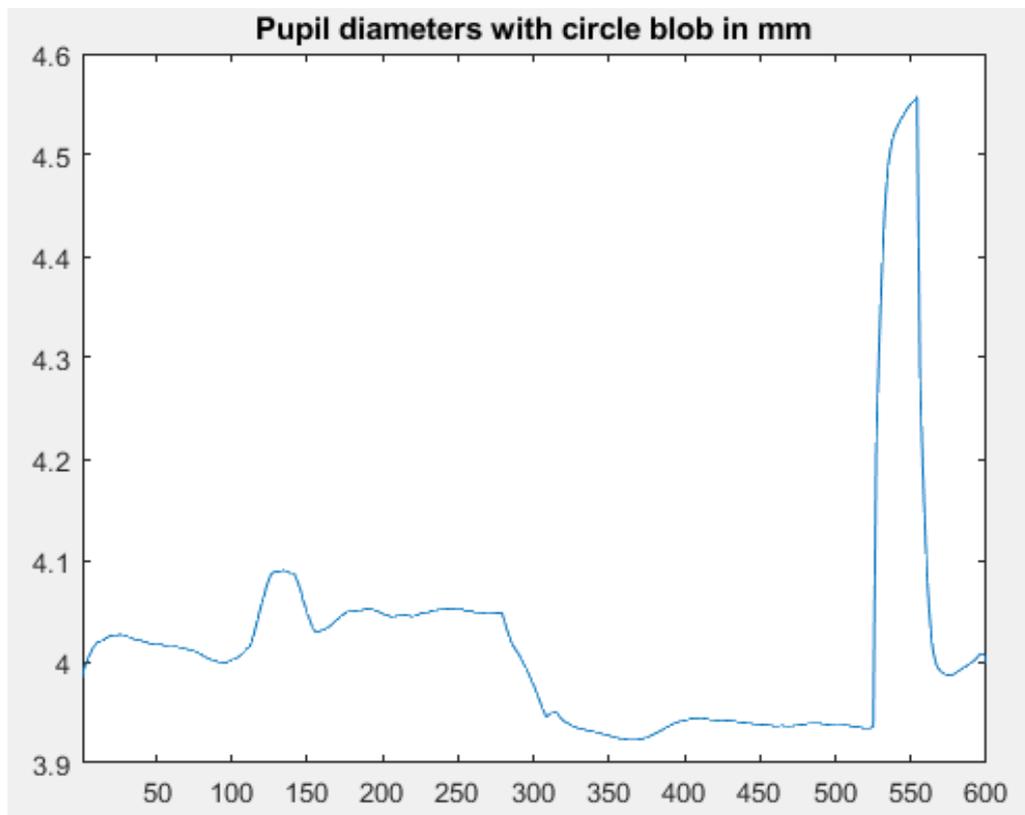
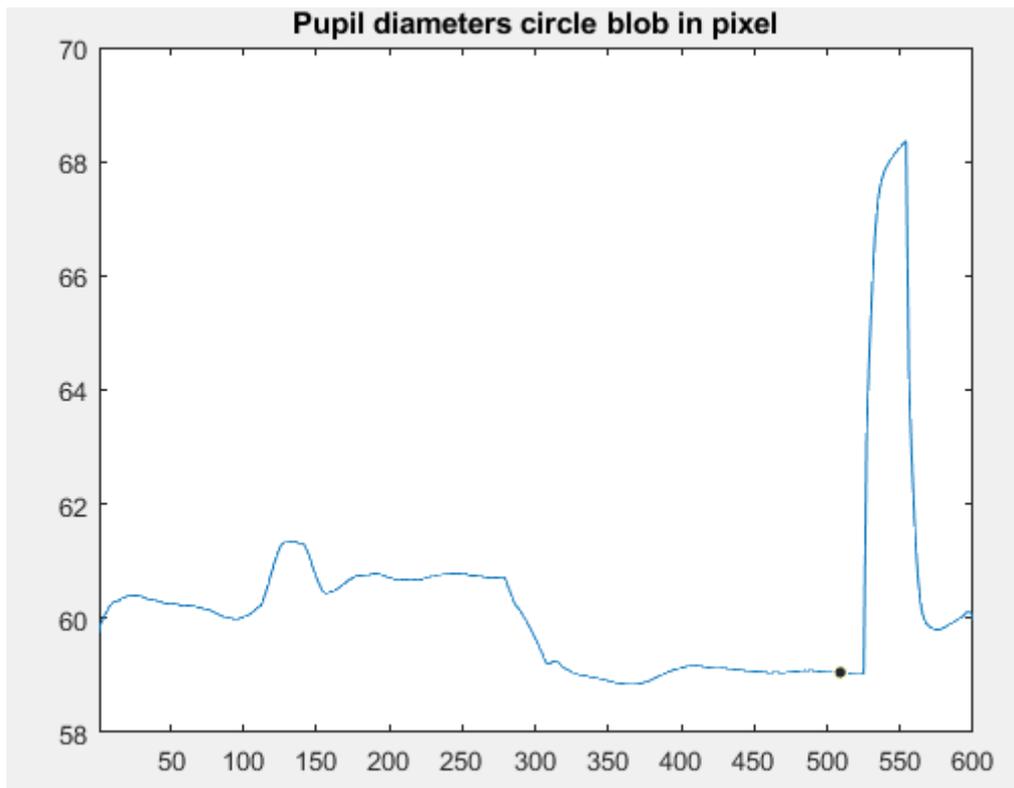
RISULTATI METODO DINAMICO						
ID	level	D. trasf. Hough max (mm)	D. Hough minimo (mm)	D.Circle Blob max(mm)	D.Circle Blob min(mm)	FrameLuce
SO1	0.09-0.15	7.7	6.7	6.61	6.4	296
SO2	0.06-0.13	6.3	2.2	5.9	1.98	289
SO3	0.05-0.17	3.46	2.8	4	3	502
SO4	0.11-0.17	6.8	5.5	6.5	4.8	350

Tabella 5.2

Di seguito inoltre vengono riportati i grafici ottenuti per il soggetto 1 (SO1)



*Grafici 5.3: metodo di Hough, sull'ascissa ci sono i frame del video mentre sull'ordinata i valori del diametro rispettivamente in pixel e millimetri*



**Grafici 5.4:** Circle Blob

I **Grafici 5.3** fanno riferimento al metodo della trasformata di Hough. Si può notare che a ridosso del frame 300 c'è una netta discesa. Questo sta a significare un'importante riduzione del diametro della pupilla del soggetto 1 proprio in seguito all'accensione della torcia (che ricade infatti al frame 296). Il picco iniziale non è dovuto a cambiamenti luminosi ma semplicemente ad un'occlusione prolungata delle palpebre per cui l'algoritmo rileva un innalzamento del diametro che non va però considerato. Tale picco è stato smussato grazie ad un filtro "smooth" ma rimane comunque parecchio evidente. Alle stesse conclusioni si giunge tenendo conto dei grafici calcolati mediante il metodo del Circle Blob. E' possibile fare un confronto tra i due metodi: anche con quest'ultimo si rileva una diminuzione del diametro della pupilla a partire dal frame 300.

Il picco che si trova sul frame 540 è dovuto ad una chiusura dell'occhio. Sul grafico di Hough è visibile questo repentino innalzamento della curva seppur sul Circle Blob esso risulta più accentuato. Notiamo che sui **Grafici 5.4** l'andamento della curva risulta più lineare e si mantiene in un intorno quasi costante (rappresentante il valore medio del diametro) mentre sui **Grafici 5.3** la funzione presenta alcuni picchi dovuti a disturbi come presenze di zone in ombra, eventuali riflessi rimasti e chiusura delle palpebre specialmente sul tratto iniziale della curva.

Entrambi i metodi sono validi: la trasformata di Hough è più sensibile a disturbi ma riesce a cogliere una variazione anche minima del diametro mentre il metodo del Circle Blob risulta più robusto a interferenze di sorta ma fornisce valori più approssimati rispetto al metodo precedente.

## 6. Conclusioni

Il lavoro presentato ha come scopo principale quello di osservare come la pupilla subisca delle variazioni importanti in particolari condizioni luminose. A tal scopo si sono studiati due metodi fondamentali, uno statico e uno dinamico.

L'analisi statica della pupilla prende in considerazione due singole immagini dell'occhio del soggetto, una in condizione di luce standard e una in condizione di forte illuminazione. L'obiettivo è stato marcare le differenze sostanziali nei due casi, e si è notato che quando l'occhio è sottoposto ad un fascio luminoso diretto la pupilla si restringe per impedire un passaggio eccessivo della luce. Questo comportamento è automatico in tutti i soggetti, non è un'azione volontaria. Ciò che l'individuo invece può controllare è l'apertura oculare: il restringimento delle palpebre è una reazione molto comune quando il volto è impattato da una forte luce. Sono state analizzate alcune problematiche sul calcolo del diametro quali la presenza di zone in ombra o riflessi che ostacolano l'individuazione corretta del contorno pupillare. Il filtraggio e il taglio dell'immagine sono le due tecniche più utilizzate per ovviare a tali problemi. Il diametro della pupilla nelle due immagini è stato calcolato mediante la trasformata di Hough e tramite il metodo dell'ellisse.

L'analisi dinamica considera invece una serie di successivi fotogrammi decompressi da un video generalmente di una durata di 20 secondi. Per arrivare ad una stima del diametro della pupilla si è sfruttata la successione di 3 algoritmi fondamentali. L'algoritmo di Viola-Jones è stato sfruttato per il rilevamento dell'occhio nell'immagine (Eye Detection), l'algoritmo di Canny per il riconoscimento e il tracciamento del contorno della pupilla e infine la trasformata di Hough per il calcolo finale del diametro. Si è parlato anche di un secondo metodo di misura ovvero il Circle Blob: dalla conoscenza dell'area della macchia pupillare individuata dopo la binarizzazione viene ricavato il raggio e quindi il diametro. Lo studio dinamico risulta altrettanto utile rispetto a quello statico poiché fornisce un andamento nel tempo rappresentabile tramite una curva. Sul grafico risultante si possono notare dei punti di interesse; un picco positivo della funzione rappresenta un aumento del diametro mentre un tratto discendente ne indica una diminuzione. La presenza di picchi troppo fitti o ispessimenti della curva sono conseguenza di disturbi spesso dovuti alla chiusura prolungata delle palpebre dei soggetti e pertanto non vanno considerati. Vanno dunque evitati qualsiasi tipo di movimento facciale e oculare durante la fase di acquisizione. Questa problematica è stata in qualche limitata utilizzando involucri e filtri. Entrambi i metodi utilizzati sono risultati essere validi: la trasformata di Hough è più sensibile a disturbi seppur vanta una miglior accuratezza visto che riesce a cogliere anche minime variazioni mentre il metodo del Circle Blob, poiché si basa su una singola funzione di ellissoide, risulta più

robusto a interferenze tipiche ma fornisce valori più approssimati rispetto al metodo precedentemente descritto.

La ricerca effettuata in questa tesi ha degli importanti riscontri nel campo biomedico, clinico e ingegneristico. La presenza di anomalie nel grafico derivante dall'analisi dinamica possono fornire importanti considerazioni su alcuni casi patologici. Se la pupilla non si restringe di fronte a cambiamenti luminosi si può diagnosticare una malattia del sistema nervoso, un deficit visivo o casi di ipovisione. I risultati forniti dalle tabelle 5.1 e 5.2 possono identificare dei valori standard per i soggetti sani; valori anomali del diametro della pupilla possono significare malattie come la cataratta. Questa patologia, che si riscontra spesso sulle persone anziane, crea nel paziente malato una patina opaca sopra l'iride, per questo chi ne è affetto tende ad avere una pupilla molto più dilatata rispetto ad un soggetto sano, dovuto al fatto che l'occhio cerca di far passare più luce possibile nel foro oculare.

La ricerca può essere di grande utilità anche nell'ambito della progettazione ingegneristica. Sappiamo che in un soggetto stressato o stanco la pupilla tende a diminuire il proprio diametro: una strumentazione ben progettata e un software correttamente programmato possono rilevare il livello di stress di un conducente di veicoli. Posizionando una videocamera all'interno dell'abitacolo (ad esempio treno o automobile) puntata sul volto del guidatore e collegata ad un algoritmo di calcolo si può allarmare il sistema nel caso in cui si registrino dei valori del diametro pupillare eccessivamente sotto la media.

## 7. Bibliografia

1. Yair Morad, Hadas Lemberg, Nehemiah Yofe, Yaron Dagan, “Pupillography as an objective indicator of fatigue”, *Department of Ophthalmology, Assaf-Harofeh Medical Center, Zerifin, Institute for Fatigue and Sleep Medicine, Sheba, Medical Center, Ramat Gan, Israel Air Force, Ramat-Gan, Israel, 2000*
2. Avinash Parnardi, Ricardo Gutierrez - Osuna, “Contactless Measurement of Heart Rate Variability from Pupillary fluctuations”, *Department of Computer Science and Engineering Texas A&M University, 2013*
3. Fatih Veysel Nurçin, Elbrus Imanov, Ali Işin\*, Dilber Uzun Ozsahin, “Lie detection of pupil size by back propagation of neural network”, *Department of Biomedical Engineering, Near East University, Near East Boulevard, Nicosia, North Cyprus, Mersin 10 Turkey, 2017*
4. Cameron Whitelam, Zain Jafri, Thirimachos Bourlai, “Multispectral Eye Detection: A Preliminary Study”, *West Virginia University, LDCSEE, 6201, Morgantown, WV, 26505, U.S.A*
5. Farmanullah Jan, “Non-circular iris contours localization in the visible wavelength eye images”, *Department of Physics, COMSATS Institute of Information Technology, Park Road, Chak Shahzad, 44000 Islamabad, Pakistan*