



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di fisica e astronomia

“Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale

in OTTICA E OPTOMETRIA

Tesi di laurea:

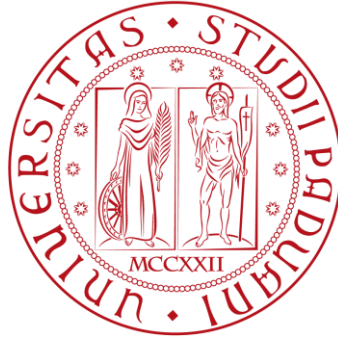
**“Moderni occhi schematici: sviluppi, applicazioni e
limiti”**

Relatore: Prof.ssa Dominga Ortolan

Laureanda: Ivana Cannella

Matr.: 1151457

Anno accademico 2018/2019



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di fisica e astronomia

“Galileo Galilei”

Corso di Laurea Triennale

in OTTICA E OPTOMETRIA

Tesi di laurea:

**“Moderni occhi schematici: sviluppi, applicazioni e
limiti”**

Relatore: Prof.ssa Dominga Ortolan

Laureanda: Ivana Cannella

Matr.: 1151457

Anno accademico 2018/2019

INDICE

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: LUCE, OCCHIO E VISIONE.....	3
1.1 Cenni storici: dai Greci fino all'avvento del mondo scientifico	3
1.2 Cenni di anatomia oculare.....	6
1.2.1 Film lacrimale.....	7
1.2.2 Cornea	8
1.2.3 Cristallino	9
1.2.4 Pupilla.....	10
1.2.5 Camera anteriore e camera vitrea	10
1.2.6 Retina.....	11
1.2.7 Punti di riferimento sul fondo oculare.....	11
1.3 Cenni di ottica geometrica	13
CAPITOLO 2: INTRODUZIONE ALL'OTTICA SCHEMATICA	14
2.1 Parametri principali dei suoi elementi.....	15
2.2 Assi dell'occhio.....	16
2.3 Angoli tra gli assi	17
2.4 Punti cardinali	18
2.4.1 Punti focali	19
2.4.2 Punti Principali	20
2.4.3 Punti nodali.....	21
CAPITOLO 3: MODELLI E SVILUPPI DI OCCHI SCHEMATICI	22
3.1 Occhio schematico esatto di Gullstrand.....	25

3.2 Occhio schematico semplificato di Gullstrand	27
3.3 Occhio ridotto di Emsley	29
3.4 Occhio schematico di Navarro	31
3.5 Modello di Liou e Brennan	31
3.6 Occhio ridotto di Thibos	33
3.7 Confronto e limiti degli occhi schematici	33
CAPITOLO 4: MODERNI OCCHI SCHEMATICI	37
4.1 Progettare un sistema ottico	37
4.2 Esempi di modelli oculari	40
4.3 Prospettive future	42
CONCLUSIONE.....	45
BIBLIOGRAFIA.....	48

INTRODUZIONE

L'occhio umano è una meraviglia della natura, ed è il principale organo della visione. Il compito dell'occhio è quello di formare un'immagine distinta del mondo esterno sulla retina: ciascun occhio regola costantemente la quantità di luce che vi penetra all'interno, mette a fuoco gli oggetti grazie al processo di accomodazione del cristallino, per formarne un'immagine sulla retina; successivamente la luce attraversa fibre e una complessa rete di cellule per arrivare ai coni e bastoncelli, i quali traducono il segnale luminoso in una serie di segnali elettrici che attraverso il nervo ottico vengono inviati al cervello. Il nervo ottico porta gli input al resto del sistema nervoso passando per il nucleo genicolato laterale che invia le informazioni al cervello e alla corteccia visiva primaria, situata nel lobo occipitale. A questo punto le informazioni che giungono dai due occhi vengono integrati per ottenere una percezione unitaria e singola. La visione ha inizio con la captazione delle immagini da parte della retina e continua con la trasmissione di queste attraverso il nervo ottico, il chiasma, i corpi genicolati per terminare nelle radiazioni ottiche della corteccia occipitale.

L'abilità di usare entrambi gli occhi insieme rende la visione migliore formando un'immagine composta, infatti l'uso simultaneo dei due occhi ci permette di ottenere una sola immagine, di formare un'unica percezione, di passare, cioè, dalla biocularità alla binocularità. Questa percezione viene detta anche "ciclopica" poiché quando osserviamo un oggetto è come se la direzione visiva risultante originasse da un occhio posto al centro tra i due reali. Affinché vi sia visione binoculare è necessario vi siano tre fenomeni, proposti da Worth, come gradi della percezione binoculare:⁽¹²⁾

I. percezione simultanea (diplopia) e sovrapposizione: capacità di percepire contemporaneamente le immagini dei due occhi. Fino a quattro mesi di vita la visione è di tipo monoculare alternata, ovvero viene cerebralmente utilizzata solo una delle due immagini provenienti dagli occhi, in quanto una viene soppressa. Questa fase viene superata intorno al sesto mese, quando tende a ridursi e pian piano a scomparire il fenomeno della soppressione.

II. fusione: caratterizzata da un aspetto motorio e uno sensorio. L'aspetto motorio implica l'attività dell'apparato muscolare per posizionare su aree

corrispondenti l'oggetto di interesse; mentre l'aspetto sensorio implica la capacità psichica di ricavare una rappresentazione visiva singola e unitaria a partire dalle due immagini retiniche.

III. stereopsi: la leggera differenza fra le due immagini retiniche, detta disparità di fissazione, viene sfruttata dalla psiche per trarre l'informazione relativa alla profondità e alla posizione spaziale dell'oggetto. Questo ci permette di avere una percezione tridimensionale. Ogni fenomeno è di livello superiore al precedente, e la presenza del grado più elevato, la stereopsi, prevede la presenza dei due precedenti.

La visione, dunque, è un processo straordinario in quanto ci permette di poter rilevare cose piccolissime e vicine come una zanzara sulla punta del naso, e cose lontane come una stella nel cielo. Fin dai tempi antichi, ricercatori esperti si chiedettero come potesse accadere questo meraviglioso fenomeno. Studiarono, man mano che le conoscenze lo permettevano, le strutture oculari, i loro funzionamenti e i meccanismi della visione disegnando e progettando modelli di occhi semplificati. Queste semplificazioni hanno permesso lo studio di fenomeni visivi e calcoli complessi che hanno fortemente contribuito a comprendere il processo visivo. Tutt'ora una delle necessità basilari dell'ottica oftalmica è quella di avere un modello di occhio al quale potersi riferire al fine di eseguire i calcoli che differenziano i valori reali da quelli standard di riferimento. L'occhio schematico è utilissimo per lo studio simulato nella ricerca delle immagini, la loro dimensione e tutto quello che interessa l'ottica dell'occhio.

CAPITOLO 1

LUCE, OCCHIO E VISIONE

1.1 Cenni storici: dai Greci fino all'avvento del mondo scientifico

La luce e di conseguenza i meccanismi di visione hanno suscitato da sempre la curiosità umana più di ogni altro aspetto della natura.

Molti filosofi cercarono di comprendere i meccanismi che stanno alla base della visione e in seguito proposero dei modelli sulla percezione visiva nell'uomo. La natura dell'immagine oculare fu studiata fin dai tempi degli antichi Greci che svilupparono infinite teorie, ma solo nel periodo rinascimentale si conseguirono studi più raffinati e meno filosofici dei meccanismi di visione.⁽¹⁾ Il pensiero dei Greci si fondava sull'ipotesi che i raggi luminosi viaggiassero in linea retta e si ipotizzava che gli stessi fossero costituiti da corpuscoli emessi, secondo alcuni come Leucippo e Democrito, dagli oggetti luminosi, secondo altri come ad esempio Pitagora, dall'occhio stesso. Infatti, Pitagora (570-495 a.c.) fu noto per la teoria "dell'emanazione": l'occhio emette un fascio di raggi che, viaggiando nello spazio, va a urtare gli oggetti, suscitando la sensazione della visione (modello emissionista). Questi raggi, simili a bastoni, sono capaci di esplorare il mondo esterno e di fornire alla psiche forma e colore dell'oggetto.⁽²⁾ Leucippo e Democrito, invece, descrissero un modello immissionista: la teoria "dell'introduzione", una teoria opposta a quella di Pitagora affermando che un flusso di corpuscoli si stacca dai corpi, conservandone la forma, entra negli occhi e li stimola. Ma alcuni studiosi si chiesero come fosse possibile che i corpuscoli dei corpi di grandi dimensioni penetrassero nella pupilla di dimensioni inferiori. Si teorizzò che i corpuscoli si contraggono, a seconda della direzione dalla quale provengono, fino a diventare tanto piccoli da attraversare la pupilla.⁽³⁾ Vi è poi un terzo modello, detto dei fluidi, della scuola Empedoclea (450 a.c.), in cui si sostenne la coesistenza dei due flussi: il primo proviene dall'esterno, è di natura corpuscolare e porta all'individuo le caratteristiche di ciò che viene visto, mentre il secondo flusso viene emesso dall'occhio come tentativo dell'anima di interagire con il mondo esterno. Euclide elaborò una specifica disciplina, l'ottica geometrica, e formulò le leggi della riflessione. L'ottica di Euclide dominò

incontrastata fino al Medioevo, salvo alcuni contributi di Tolomeo e di Erone relativi soprattutto a nuovi dati sperimentali sul fenomeno della rifrazione. Si iniziò ad avere una buona consapevolezza dell'anatomia oculare. Venne scoperto anche il cristallino, creduto l'organo centrale dell'occhio.⁽⁴⁾

In seguito al declino della civiltà Greca, l'occhio e di conseguenza la visione sono stati oggetto di interpretazioni molto contrastanti per tutto il corso della storia. Durante la fine del primo millennio d.C., gli arabi affermarono che erano gli oggetti a emanare piccoli elementi che, viaggiando in modo rettilineo dalla pupilla, arrivavano alla retina. Questo modello fu proposto da Alhazen, il quale modificò il modello immissionista criticando la teoria dei raggi visuali. Egli sostenne che, se la visione avvenisse attraverso l'emissione di raggi, dopo la chiusura degli occhi la sensazione visiva non dovrebbe persistere; e non si dovrebbe provare alcun fastidio nell'osservazione diretta del sole, perché l'occhio non emetterebbe appunto i raggi.⁽⁵⁾

Nel Rinascimento i progressi tecnologici apportarono importanti nuovi contributi che permisero il progressivo affermarsi della teoria immissionista.⁽²⁾ In quel periodo l'ottica fece nuovi passi in avanti: gli occhiali vennero usati per migliorarne la visione, furono scoperti telescopio e microscopio, si sviluppò l'idea della formazione dell'immagine nell'occhio come in una camera oscura. Molti religiosi furono contrari ad alcune invenzioni ottiche poiché ritenevano ingannevole il fatto che l'immagine in retina fosse invertita.⁽⁴⁾

Fino al XVII secolo si ritenne che la luce fosse un flusso di corpuscoli che, emessi da sorgenti luminosi come il sole, si propagassero dalla sorgente verso l'esterno lungo linee rette. Quando i corpuscoli colpivano l'occhio veniva stimolata la vista. Questa teoria venne definita da Newton "teoria corpuscolare". Quest'ultima fu in contrapposizione ai sostenitori della teoria ondulatoria della luce, anche perché Newton riuscì a spiegare la riflessione tramite il rimbalzo delle particelle nel momento dell'urto con una superficie, ma la stessa teoria non portò a una spiegazione della rifrazione.⁽⁶⁾⁽⁷⁾ L'ipotesi ondulatoria fu proposta per la prima volta da Huyghens, e affermò che la luce fosse come un'onda che si propaga in un mezzo, in linea retta a velocità finita. Huyghens fu anche importante per la realizzazione del primo occhio schematico ridotto. La teoria ondulatoria, se da un

lato spiegò sia la riflessione che la rifrazione, dall'altro diede campo a nuovi quesiti. Studiosi si chiedettero, dato che le onde vennero considerate perturbazioni di un mezzo materiale, come la luce potesse viaggiare nel vuoto.⁽⁴⁾⁽⁶⁾ Per tutto il XVIII secolo le due teorie alternative rimasero in competizione. Tuttavia nel secolo successivo tutta una serie di acquisizioni sperimentali e teoriche sembrarono seguire la teoria ondulatoria. Solamente con gli esperimenti di Thomas Young, studiando il fenomeno dell'interferenza e successivamente la polarizzazione delle onde luminose, si riuscirono a chiarire le controversie della teoria corpuscolare. Inoltre, Young riuscì a misurare la lunghezza d'onda della luce, scoprì l'astigmatismo, e dimostrò anche che l'accomodazione non era dovuta a cambiamenti nella lunghezza dell'occhio o a variazioni nella curvatura della cornea.⁽⁸⁾ Il passo successivo si deve a Maxwell che propose la sua teoria alla fine del XIX secolo. Egli affermò che le onde luminose non necessitano di un mezzo per la trasmissione, perché sono onde elettromagnetiche. Inoltre, mostrò che la luce visibile è una parte dello spettro elettromagnetico. Questa teoria è ancora utilizzata al giorno d'oggi in moltissime applicazioni.⁽⁷⁾

Il modello ondulatorio di Huygens sembrò quello corretto fino agli inizi del Novecento, quando nel 1905 Einstein postulò che l'energia di un'onda elettromagnetica non è uniformemente distribuita nello spazio ma è concentrata in piccoli pacchetti di energia chiamati fotoni o quanti di luce.⁽⁹⁾ Il XX secolo fu caratterizzato dallo sviluppo di nuove tecniche per la misurazione in vivo delle strutture oculari.⁽⁴⁾

I fisici, oggi, ammettono un comportamento duale della luce poiché convivono entrambe le nature: i fenomeni di propagazione della luce sono descritti dalla teoria ondulatoria elettromagnetica, invece i fenomeni di interazione della luce con la materia sono descritti dalla teoria corpuscolare.⁽⁶⁾ Ricerche recenti dimostrano che il processo legato alla visione risulta complicato: la luce colpisce l'oggetto, i raggi riflessi raggiungono l'occhio ed entrano attraverso la pupilla. Quest'ultima modifica le proprie dimensioni in base all'intensità della luce, ingrandendosi in condizioni di scarsa illuminazione e rimpicciolendosi nel caso opposto. A questo punto la luce entrando attraverso la pupilla arriva al cristallino, il quale, a seconda della distanza dell'oggetto osservato, cambia forma per

convogliare la luce in retina, dopo aver attraversato l'umor vitreo che grazie alla sua trasparenza non varia lo stimolo luminoso in arrivo. Quindi, attraversando il cristallino, i raggi visivi convergenti si incrociano e arrivano capovolti sulla parete di fondo dell'occhio, la retina, dove proiettano l'immagine capovolta dell'oggetto osservato. Sulla retina sono disposte delle cellule fotosensibili, i coni e i bastoncelli, che fungono da fotorecettori, cioè ricevono i messaggi luminosi e li traducono in impulsi elettrici. Tali impulsi vengono trasmessi dal nervo ottico al cervello dove l'immagine viene ricomposta nel senso giusto dalle cellule nervose della corteccia cerebrale. Dunque, il percorso della luce-occhio è abbastanza complicato e possiamo riassumerlo nel seguente modo: da ogni punto della zona circostante all'oggetto l'occhio riceve un fascio di raggi luminosi divergenti; grazie al cristallino questi raggi vengono concentrati in un punto della retina formando così un gran numero di punti immagine che, insieme, costituiscono l'immagine retinica dell'oggetto. Quest'ultima viene elaborata dalla zona occipitale del cervello.⁽¹⁰⁾ Appare chiaro, quindi, che la prerogativa di una visione chiara e distinta sia costituita dall'integrità anatomico-funzionale di tutte le strutture oculari deputate, ma soprattutto dall'integrità del lobo occipitale.

1.2 Cenni di anatomia oculare

“L'occhio o bulbo oculare è un organo dall'aspetto sferoidale, dalla lunghezza di 24 mm, dal peso medio di 7,5g e dal volume di 6,5cm³.”⁽¹¹⁾

Esso è costituito da tre tuniche o membrane e contiene nel suo interno tre camere. La parte anteriore più curva e trasparente viene detta cornea, questa si continua con la sclera che si estende posteriormente fino a racchiudere l'occhio. Queste due strutture formano la tunica fibrosa, quella più esterna. La tunica intermedia (tunica vascolare) è formata dall'iride, corpo ciliare e coroide, e infine la tunica nervosa, quella più interna è costituita dalla retina. Posteriormente alla cornea si trova la camera anteriore riempita di umor acqueo, e posteriormente al cristallino si trova la camera vitrea contenente l'umor vitreo.⁽¹¹⁾⁽¹²⁾ (*Figura 1.1*)

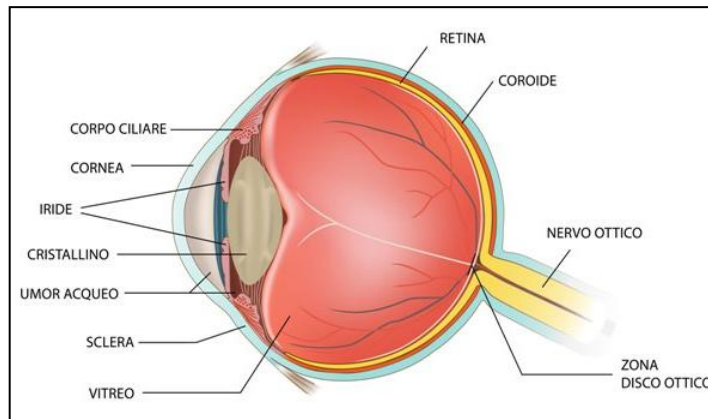


Figura 1.1: Anatomia e parti dell'occhio

L'occhio ha funzioni talmente complesse che nessun apparecchio moderno come un computer, una macchina fotografica, un telefono, o una telecamera, è in grado di eguagliare. L'occhio riesce a formare un'immagine reale degli oggetti sulla retina. Può essere paragonato a una macchina fotografica: esattamente come l'apparecchio che tutti conosciamo, nell'occhio le lenti convergenti sono rappresentate dalla cornea e dal cristallino e possono essere paragonate all'obiettivo di una macchina fotografica che fa convergere i raggi luminosi sulla retina; la pupilla, invece, si restringe e si dilata a seconda dell'intensità della luce e quindi può essere equiparata al diaframma di una macchina fotografica; infine, la retina può essere paragonata allo schermo sul quale si formano le immagini. Dunque, l'occhio ha un sistema di messa a fuoco automatico, regola l'intensità luminosa, ha la capacità di seguire le immagini e una sofisticata capacità di analisi.⁽¹³⁾

1.2.1 Film lacrimale

Il film lacrimale è una pellicola trasparente, uno strato fluido e sottile, che ricopre totalmente la cornea, la sclera (visibile), e la congiuntiva fino alla rima palpebrale. In sintesi si può affermare che il film lacrimale ricopre la superficie esterna del bulbo oculare.⁽¹⁴⁾

La funzione del film lacrimale è mantenere efficienti la cornea, la congiuntiva e le palpebre del sistema visivo.⁽¹⁵⁾

Il film lacrimale ha: uno spessore di circa 4-6 μm ; un indice di rifrazione (n) di 1,336; lo stesso raggio di curvatura “corto” come per la cornea sottostante; presenta tre strati (lipidico, acquoso e mucoso) e questa sua stratificazione comporta una naturale quantità di riflessione.⁽⁴⁾ Secondo recenti studi, il film lacrimale presenta uno spessore più sottile di quanto emerso dagli studi precedenti, che varia da 2 a 5,5 μm sulla regione corneale, ed un pH che varia da 6,8 a 8,2, con valori individuali compresi tra 5,2 e 8,6.⁽¹⁶⁾ La distribuzione del film è fornito dall’ampio movimento della palpebra superiore durante la fase di ammiccamento. Il film lacrimale è più spesso subito dopo l’ammiccamento.⁽¹⁷⁾

Il volume totale del film lacrimale in condizioni basali varia da 7 a 9 μl a 70 anni; il massimo volume che può essere trattenuto, senza che fuoriesca sulla cute palpebrale è di 30 μl . Il volume è maggiore nei giovani e si riduce in maniera lineare con l’età. Il 70-90% del volume totale del film lacrimale nell’apertura palpebrale è presente sui menischi. Il volume lacrimale totale è rinnovato ogni 15-20 s. La velocità di flusso è di 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ e la produzione di lacrime è di 12 $\mu\text{l}/\text{min}$ in condizioni basali.⁽¹²⁾

1.2.2 Cornea

La cornea rappresenta la struttura con il maggior potere refrattivo del sistema visivo. Contribuisce al 70% del potere refrattivo dell’occhio (2/3 del potere totale dell’occhio) grazie alla differenza di indice di rifrazione tra aria e cornea. La superficie anteriore della cornea separa l’aria dalla sostanza che costituisce la cornea stessa. Di fatto il contatto con l’aria è riservato al film lacrimale senza il quale la funzionalità ottica della cornea non sarebbe la stessa.⁽¹⁸⁾ L’indice di rifrazione (n) dell’aria è 1, invece quello della cornea è di 1,377. Inoltre, la cornea presenta una superficie posteriore più curva (raggio medio di circa 6,80 mm) rispetto a quella anteriore (raggio medio di 7,70 mm), così che la cornea in sezione appare come un menisco negativo.

Trascurando lo spessore, la potenza equivalente della cornea è di circa 43D, poiché con l'equazione per la potenza delle superfici abbiamo: ⁽¹⁹⁾

$$\text{Potenza della faccia anteriore} = \frac{(1,377-1)}{0,0077} = 48,96$$

$$\text{Potenza della faccia posteriore} = \frac{(1,337-1,377)}{0,0068} = -5,88$$

La cornea è una struttura trasparente avascolare formata da strati differenti, ma considerata omogenea con spessore che varia tra 0,5 mm al centro e 1 mm nella porzione periferica. Infatti la superficie corneale è “regolarmente” asferica. ⁽²⁰⁾

1.2.3 Cristallino

Il cristallino è una lente biconvessa, trasparente, che si trova sospeso subito dopo l'iride, mantenuto in situ da un anello sospensorio anulare ancorato al corpo ciliare. ⁽¹²⁾ La lente è posta a circa 3,5 mm dal vertice della cornea e a 16 mm dalla fovea. ⁽²¹⁾ Ha un diametro di 10 mm, e uno spessore centrale di 3,6 mm che raggiunge i 4 mm se accomodato. ⁽¹²⁾ Il cristallino, che non è omogeneo, ha un indice di rifrazione medio di 1,437. ⁽²²⁾

Il cristallino e la cornea sono i due elementi refrattivi principali. La cornea ha il potere refrattivo maggiore, invece il cristallino ha la proprietà di modificare la propria curvatura producendo un potere refrattivo addizionale (accomodazione). Esso devia i raggi per farli convergere funzionalmente sulla retina. Quando l'occhio accomoda per guardare nitidamente a una distanza ravvicinata, il cristallino aumenta la sua potenza diottrica. Si ha così un aumento della curvatura (diminuzione del raggio di curvatura) della faccia anteriore, un piccolo aumento di curvatura della faccia posteriore e un lieve spostamento in avanti dovuto all'aumento di spessore. ⁽¹⁹⁾

Il muscolo ciliare può far aumentare la curvatura del cristallino fino a formare immagini nitide a circa 15 cm dall'occhio (punto prossimo). ⁽²³⁾

Quando, invece, il cristallino è disaccomodato, la faccia anteriore e quella posteriore hanno raggi rispettivamente di 10,00 e 6 mm. Presenta, inoltre, una potenza equivalente di circa 20D, ⁽¹⁹⁾ cambia con l'età e cresce in continuazione. ⁽²⁴⁾

1.2.4 Pupilla

La pupilla è un orifizio situato al centro dell'iride. Limita i raggi in entrata della cornea e migliora la messa a fuoco restringendosi quando l'illuminazione è sufficiente. Infatti se la pupilla va in miosi, aumenta la profondità di campo e riduce le aberrazioni ottiche. Dunque la pupilla controlla il flusso luminoso in entrata, modifica la profondità di messa a fuoco, e varia l'entità delle aberrazioni ottiche presenti.⁽²⁵⁾

Il diametro pupillare varia da 2,5 a 6 mm ed è più ampio nel giovane. Questo varia per il livello di illuminazione, per l'età, per la visione binoculare (riflesso consensuale) e accomodazione, per l'assunzione di sostanze stupefacenti, e per i fattori psicologici (emozioni, concentrazione).⁽¹⁶⁾

L'ampiezza della pupilla è regolata dai muscoli costrittore e dilatatore, siti nell'iride, che esercitano azioni antagoniste.

1.2.5 Camera anteriore e camera vitrea

La camera anteriore è la cavità tra la cornea, l'iride e la superficie anteriore del cristallino. Ha una profondità di circa 3,1mm. Diminuisce con l'età e con l'accomodazione.⁽²⁶⁾ È riempita dall'umor acqueo (98% acqua). Gran parte di esso (4/5) è contenuto nella camera anteriore, il rimanente si trova nella camera posteriore e viene prodotto continuamente ad un ritmo di 2-2,5 mm³/min.⁽²⁷⁾ Si tratta di un liquido trasparente molto simile al plasma sanguigno, è secreto dai capillari e fornisce sostanze nutritive ed ossigeno al cristallino, all'iride ed alla cornea portando via le sostanze di rifiuto. È importante perché crea e mantiene la pressione interna dell'occhio. Inoltre, viene continuamente rinnovato e ha un indice di rifrazione (n) di 1,336.⁽²⁸⁾

La camera vitrea, spazio compreso tra la superficie posteriore del cristallino e la retina, ha una profondità di circa 16 mm. Nell'uomo è più lunga di 0,5 mm rispetto all'occhio della donna ovvero l'occhio della donna è più potente di 2D.⁽²⁹⁾

L'umor vitreo è una struttura gelatinosa e trasparente che riempie la camera vitrea che a differenza dell'umor acqueo non si rinnova. Occupa all'incirca i 2/3 del

globo oculare, ha un volume di $3,9 \text{ cm}^3$ ed un peso di circa 4 grammi.⁽³⁰⁾ È composto dal 99% di acqua e dal restante 1% di fibre collagene, acido ialuronico e ialociti.⁽³¹⁾ L'indice di rifrazione del vitreo può essere considerato come quello dell'umore acqueo ($n=1,336$).⁽¹⁹⁾ La sua funzione principale è di sostenere e proteggere le strutture oculari, inoltre grazie alla sua trasparenza permette il passaggio della luce alla retina.⁽³²⁾

1.2.6 Retina

La retina, la più interna delle tre tuniche che costituiscono la parete del bulbo oculare, è l'organo responsabile della trasduzione della luce in segnale neuronale. È suddivisa in due parti: una retina cieca ed una retina ottica. La retina cieca, che rappresenta circa $1/3$ della retina totale, è un sottile strato pigmentato che riveste i corpi ciliari e la faccia posteriore dell'iride.⁽³³⁾ Non presenta fotorecettori e non viene raggiunta dalla luce. La retina ottica, o neuroretina, invece è l'unica parte ad essere raggiunta dalla luce ed a presentare i fotorecettori. Costituisce $2/3$ della retina ed è formata da dieci strati.⁽³¹⁾ Ha uno spessore di $1/4$ di mm. I fotorecettori sono elementi nervosi deputati alla trasformazione dello stimolo luminoso in impulso elettrico e si distinguono in coni e bastoncelli. I coni sono circa 7 milioni in tutta la retina, concentrati nella zona centrale della macula, la fovea, e sono deputati alla visione nitida, dettagliata e ai colori. Invece, i bastoncelli sono circa 120 milioni in tutta la retina, sono specializzati nella visione periferica e nella visione a bassa luminanza, ma non si trovano in fovea.⁽³⁴⁾

1.2.7 Punti di riferimento sul fondo oculare

Sul fondo oculare dell'occhio vi sono delle regioni di notevole importanza:⁽¹⁹⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ (*Figura 1.2*)

- Perifovea o paramacula: zona della retina in cui al centro si trova la fovea per un'estensione di circa 1,75 mm. In questa zona i coni si riducono mentre i bastoncelli aumentano. Al centro della fovea si trova la foveola.

- Fovea: zona retinica rotondeggiante di circa 1,5 mm, situata nel polo posteriore dell'occhio verso il lato tempiale, a 0,8mm più in basso della papilla.
- Foveola o fovea centrale: depressione più profonda della retina. Ha una forma rotondeggiante al centro della macula, circa a 0,5 mm sotto il centro papillare. Maggiore prevalenza dei coni. È caratterizzata dall'assoluta avascolarità.
- Macchia cieca o papilla ottica: zona ovale in cui il nervo ottico entra nell'occhio. È cieca poiché sprovvista di recettori. La lunghezza verticale è di circa 5°; il suo centro è a circa 15° dal lato nasale e circa 2° al di sopra della foveola. In generale la distanza tra il centro della papilla e la macula è di circa 3 volte il diametro papillare stesso.

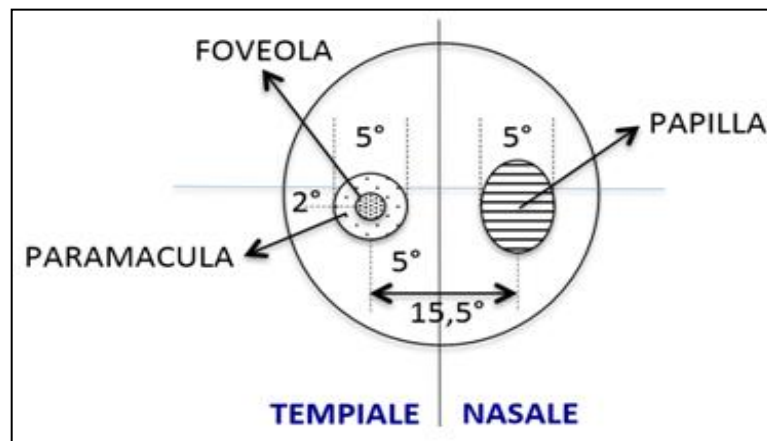


Figura 1.2: Punti di riferimento sul fondo oculare

1.3 Cenni di ottica geometrica

L'ottica geometrica è la più antica branca dell'ottica che studia i fenomeni ottici. Essa tratta quei fenomeni che possono essere descritti senza far uso del concetto di onda, ovvero studia i fenomeni luminosi provocati dall'emissione da parte di sorgenti di onde elettromagnetiche nello spettro del visibile (430-690 nm). Il suo principio è che la luce si propaga in linea retta.⁽¹³⁾ L'ottica geometrica è stata formulata a metà del XVII secolo da Fermat a partire da un semplice principio: “Fra tutti i cammini possibili la luce sceglie sempre il cammino (detto cammino ottico) che richiede il più breve cammino per essere percorso”. I raggi, passando da un mezzo all'altro, subiscono un rallentamento se incidono perpendicolarmente, oppure una deviazione se incidono formando un angolo. Dalla legge di Fermat derivano le due leggi fondamentali dell'ottica geometrica che governano la propagazione della luce: la legge della riflessione e della rifrazione. Ricordiamo le seguenti leggi, sapendo che il raggio incidente, quello rifratto e la normale alla superficie di separazione giacciono sullo stesso piano.⁽³⁶⁾

- Legge della riflessione: l'angolo di incidenza θ_i (angolo tra il raggio incidente e la normale) e l'angolo di riflessione θ_r (angolo tra il raggio riflesso e la normale) sono uguali.
- Legge della rifrazione: la relazione tra gli angoli di incidenza e di rifrazione e gli indici di rifrazione è data dalla legge di Snell:

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r$$

L'ottica geometrica può essere considerata un metodo per la costruzione di immagini date da sistemi ottici, ovvero le sue conoscenze sono utili per capire come le lenti, gli specchi e i prismi modificano la direzione dei raggi di luce. Questo è un aspetto importante soprattutto per chi vuole occuparsi di lenti e occhiali.⁽³⁷⁾ In ottica geometrica sono importanti i segni dei valori inseriti per il calcolo.

CAPITOLO 2

INTRODUZIONE ALL'OTTICA SCHEMATICA

Da quando gli studiosi si sono interessati all'ottica visuale, si sono sempre trovati di fronte alle necessità di disporre di modelli geometrici in grado di simulare il comportamento dell'occhio. Considerando l'ottica dell'occhio come un sistema di superfici sferiche centrate, per poter effettuare dei calcoli su di esso, è stato più facile rappresentarlo in una forma più semplificata.

Gli occhi possono differire nella struttura e dimensioni, l'uno dall'altro. Talvolta vi possono essere delle apprezzabili variazioni anche tra occhi emmetropi, ma l'analisi di innumerevoli misure su diversi occhi, ha dato, come media, dei dati che useremo come delle costanti.⁽¹⁹⁾

Dunque per poter studiare l'occhio e le sue peculiarità è utile lavorare su modelli oculari i cui parametri principali sono ricavate dalle medie sulle misurazioni della popolazione.

I modelli schematici dell'ottica oculare permettono di semplificare lo studio dei fenomeni ottici oculari, perché:⁽⁴⁾

- L'ottica del sistema oculare è complessa
- L'occhio umano, come strumento ottico, non è perfetto
- Le superfici rifrangenti non sono centrate (i raggi che passano per il centro di cornea, pupilla e cristallino non sono allineati alla fovea).

L'occhio si comporta come un diottro sferico. La formula classica per calcolare la potenza del diottro, conoscendo gli indici di rifrazione e curvatura, è:

$$P = \frac{n' - n}{R}$$

Dove P è la potenza calcolata in Diottrie, R è il raggio di curvatura espresso in metri ed n' e n sono gli indici di rifrazione rispettivamente del secondo e del primo mezzo. Prendendo in riferimento la formula sopra, possiamo calcolare la potenza dei quattro diottri componenti l'occhio:

- Faccia anteriore della cornea: +48,20 D
- Faccia posteriore della cornea: -5,90 D
- Faccia anteriore del cristallino: +7,40 D
- Faccia posteriore del cristallino: +12,33 D

La potenza totale dell'occhio non è uguale alla somma algebrica delle potenze dei quattro diottri (62,03 D) perché bisogna tenere in considerazione anche la distanza relativa dei vari diottri tra di loro. La potenza reale dell'occhio, infatti, è di circa 60 D, in questo modo si è creata un'approssimazione utile per facilitare la costruzione di un occhio schematico.⁽³⁸⁾ Dunque possiamo concludere che l'occhio è un sistema positivo (lente convessa) di +60 D, ha un fuoco e un centro ottico, e ha un campo visivo ampio.

2.1 Parametri principali dei suoi elementi

Gli elementi che costituiscono l'occhio, grazie ai diversi parametri (*Tabella I*) che li costituiscono e quindi alla diversa struttura, permettono di far funzionare l'occhio.

Tabella I: parametri principali degli elementi che costituiscono l'occhio. A ogni elemento corrisponde un raggio, uno spessore, un indice di rifrazione e una posizione rispetto alla cornea anteriore.

Parametri principali					
Element	Surface	Radius (mm)	Thickness (mm)	Refractive Index	Position (mm)
Air				1.000	
Cornea	Anterior	7.7	0.50	1.376	0.0
	Posterior	6.8			0.50
Aqueous			3.10	1.336	
Anterior lens cortex	Anterior	10.0	0.546	1.386	3.60
	Posterior	-6.0			
Lens core			2.419	1.406	4.146
Posterior lens cortex	Anterior	7.911	0.635	1.386	6.565
	Posterior	-5.76			7.20
Vitreous			16.80	1.336	
Retina		-12.0			24.0

2.2 Assi dell'occhio

Le diverse strutture oculari non sono coassiali, e quindi si fa riferimento ai diversi assi e agli angoli tra gli assi. (*Figura 2.1*)

- ❖ Asse ottico: passa in posizione media tra i centri di curvatura di cornea e cristallino e contiene punti focali, principali e nodali. Non interseca la retina a livello della fovea, ma di norma a circa 1.5mm (5°) nasalmente e 0.5mm (1.5°) superiormente (in un punto molto vicino alla macula).⁽³⁵⁾
- ❖ Asse visivo o visuale: retta che congiunge l'oggetto di interesse al centro della fovea, passando per il punto nodale e per il punto di fissazione. È uno degli assi più importanti perché cade sulla fovea.⁽¹⁹⁾
- ❖ Asse pupillare: linea che passa attraverso il centro della pupilla d'entrata e il punto nodale. Se la pupilla fosse centrata alla cornea, l'asse pupillare coinciderebbe con l'asse ottico.⁽³⁵⁾⁽³⁹⁾
- ❖ Asse di sguardo: asse che congiunge il centro della pupilla d'entrata con l'oggetto osservato. Nonostante la linea di sguardo sia un raggio difficile da tracciare, esso si rivela molto utile, poiché individua sempre il centro del fascio di raggi che attraversa la pupilla, e perciò il centro del disco di confusione.⁽³⁵⁾⁽¹⁹⁾
- ❖ Asse di fissazione: linea che congiunge il punto di fissazione con il centro di rotazione dell'occhio. È il riferimento per misurare i movimenti oculari. Il centro di rotazione dell'occhio però non è fisso ma in continuo spostamento in base alle differenti direzioni di sguardo.⁽⁴⁰⁾
- ❖ Asse cheratometrico: contiene il centro di curvatura della cornea anteriore, viene usato per l'allineamento nelle misure topografiche.⁽³⁹⁾

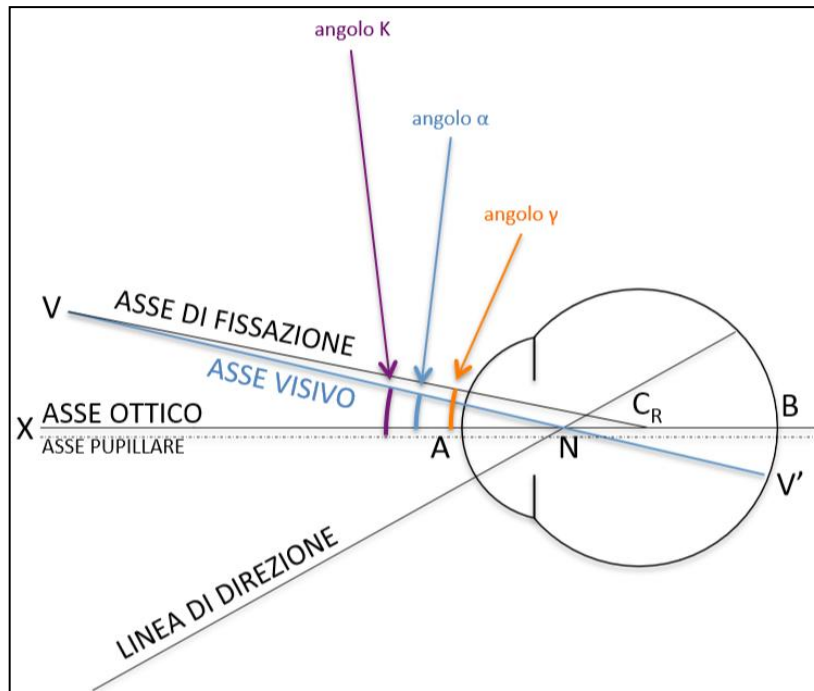


Figura 2.1: assi dell'occhio e angoli tra gli assi. C_R indica il centro di rotazione, N il punto nodale, e la retta AB l'asse ottico in cui A rappresenta il polo anteriore e B il polo posteriore.

2.3 Angoli tra gli assi

Per comodità si possono individuare angoli compresi tra gli assi di un occhio. I più usati sono:

- ❖ Angolo alfa (α): angolo tra l'asse ottico e l'asse visivo. Esso, misurato al punto nodale, è di circa 5° .⁽¹⁹⁾
- ❖ Angolo gamma (γ): angolo tra l'asse di fissazione e l'asse ottico. L'angolo α e l'angolo γ differiscono tra di loro di una piccolissima quantità e in pratica si usa prendere in considerazione solo l'angolo α . Infatti per oggetti lontani i due assi tendono a fondersi e quindi l'angolo gamma tende a zero.⁽¹⁹⁾⁽⁴¹⁾

- ❖ Angolo lambda (λ): angolo tra asse pupillare e linea di sguardo. Questo è importante per la diagnosi di fissazione eccentrica ed eterotropia, per esempio viene misurato in caso di strabismo. Nella pratica non si riscontra una differenza significativa tra l'angolo kappa e l'angolo lambda.⁽³⁵⁾

- ❖ Angolo kappa (k): angolo compreso tra l'asse pupillare e l'asse visivo. L'angolo k è detto positivo quando l'asse visivo passa all'interno dell'asse pupillare, è detto negativo quando l'asse pupillare è all'interno dell'asse visivo. La condizione più frequente è quella in cui l'angolo k è positivo, e il suo valore medio è di $+5^\circ$. L'angolo k è correlato alle ametropie assiali. Aumenta in relazione alla diminuzione della lunghezza assiale dell'occhio e quindi nell'ipermetropia assiale, mentre diminuisce in relazione all'aumentare della lunghezza assiale dell'occhio ovvero nella miopia assiale.⁽⁴²⁾

2.4 Punti cardinali

Anche per l'occhio, inteso come sistema ottico centrato, si possono definire 6 punti cardinali (3 coppie di punti) che giacciono sull'asse ottico, e sono: i punti focali F e F', i punti principali P e P', e i punti nodali N e N'. (*Figura 2.2*) La loro posizione dipende dalla struttura dell'occhio e dal grado di accomodazione.

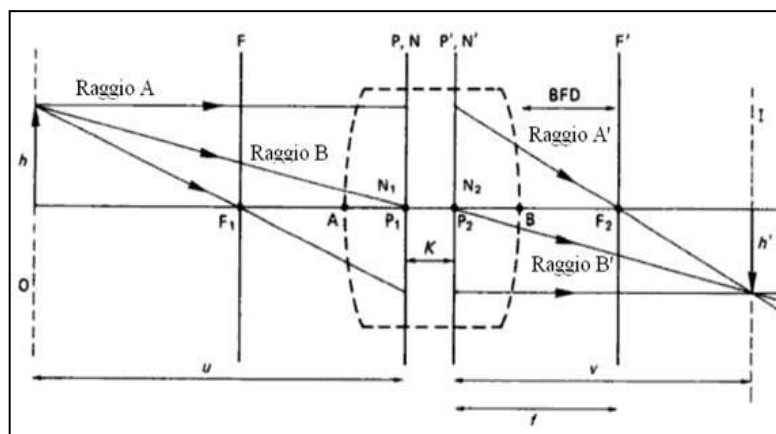


Figura 2.2: Punti cardinali e i rispettivi piani. F corrisponde al piano focale anteriore; F_1 punto focale anteriore; P piano principale anteriore; P_1 punto principale anteriore; N piano nodale anteriore; N_1 punto nodale anteriore; N' piano nodale posteriore; N_2 punto nodale posteriore; P' piano principale posteriore; P_2 punto principale posteriore; F' piano focale posteriore; F_2 punto focale posteriore.

2.4.1 Punti focali

F e F' sono i punti focali anteriore e posteriore (oggetto e immagine) della lente.

Viene definito primo punto focale o primo fuoco il punto oggetto posto sull'asse ottico la cui immagine è all'infinito. In altre parole, nell'occhio la luce che lascia F passa attraverso le superfici refrattive oculari e va all'infinito (se non consideriamo la retina). Invece, la luce che viaggia parallela all'asse ottico, proveniente dall'infinito, forma l'immagine su F' , coincidente con la retina, ovvero il secondo punto focale o secondo fuoco è il punto immagine di un punto oggetto posto sull'asse ottico ed infinitamente lontano.⁽³⁹⁾⁽⁴³⁾

Il fuoco oggetto può essere “reale” se è dato dall'intersezione dei raggi incidenti, oppure “virtuale” se è dato dall'intersezione dei prolungamenti dei raggi incidenti. Lo stesso vale per un fuoco immagine.⁽³⁸⁾

Il primo piano focale è un piano normale all'asse ottico che passa per il primo fuoco. Analogamente il secondo piano focale è il piano normale all'asse passante per il secondo fuoco. Inoltre, la distanza tra il primo fuoco e il primo punto principale è detta prima distanza focale e solitamente viene indicata con f , quindi di conseguenza la seconda distanza focale (f') è la distanza tra il secondo punto principale e il secondo fuoco.⁽⁴⁴⁾

La prima e la seconda distanza focale si calcolano rispettivamente con le seguenti equazioni:⁽⁴⁵⁾

$$f = \frac{nR}{n'-n} \qquad f' = \frac{n'R}{n'-n}$$

Come si vede, le distanze focali non sono uguali poiché $n \neq n'$. Da queste equazioni si calcola il rapporto tra le due distanze che risulta essere uguale a:⁽⁴⁵⁾

$$\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n}$$

2.4.2 Punti Principali

I punti principali sono punti di intersezione dei piani principali con l'asse ottico. I piani principali sono assi ortogonali all'asse ottico, dove immagine e oggetto hanno la stessa dimensione.

I raggi diretti che passano dal primo punto principale proseguono come se venissero traslati con la stessa direzione dal secondo punto principale.⁽³⁹⁾

Il primo punto principale (oggetto) si trova a circa 1,40 mm dall'apice corneale, il secondo punto principale (immagine) a circa 1,70 mm dallo stesso apice. In pratica però si preferisce prendere un solo punto principale a circa 1,50 mm dall'apice corneale.⁽¹⁹⁾ (Figura 2.3)

2.4.3 Punti nodali

I punti nodali anteriore e posteriore sono posti sull'asse ottico e individuano i centri ottici della lente. Il raggio incidente, che incontra il punto nodale oggetto, fuoriesce dal punto nodale immagine parallelo a se stesso. In altre parole, nei punti nodali il raggio incidente ed il raggio rifratto formano con l'asse ottico lo stesso angolo. Se oggetto e immagine si trovano nello stesso mezzo, punti principali e punti nodali coincidono.⁽⁴⁶⁾

Il punto nodale oggetto si trova a circa 7 mm dall'apice corneale, a 7,40 mm quello immagine. Nella pratica, data la distanza tra i due punti, si usa prendere un punto nodale medio, a circa 7,20 mm, così che quella distanza coincida grossolanamente con la faccia posteriore del cristallino.⁽¹⁹⁾ (Figura 2.3)

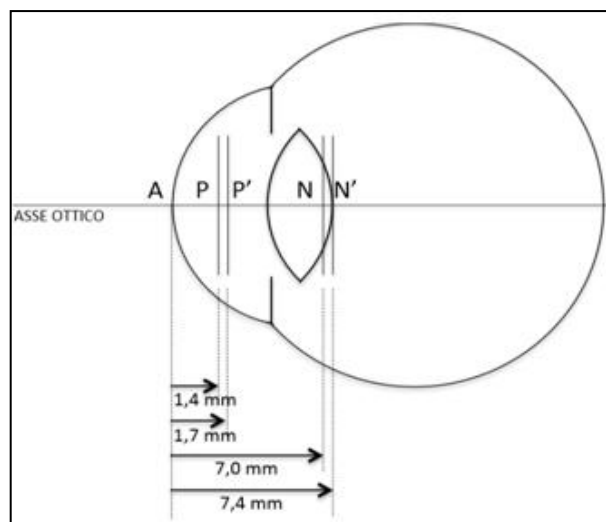


Figura 2.3: Punti principali P e P', punti nodali N e N'. A indica l'apice corneale.

CAPITOLO 3

MODELLI E SVILUPPI DI OCCHI SCHEMATICI

L'interesse per gli aspetti fisiologici e per le proprietà ottiche dell'occhio umano, e i loro rapporti con la capacità di vedere, ha origini antiche.

La complessità del nostro occhio è evidente, accentuata dalla diversità delle dimensioni e dalle caratteristiche che variano da soggetto a soggetto. Fin dall'antichità nacquero nuovi modelli di occhi schematici per rispondere all'interesse che suscitò l'ottica visuale, simulando, sia pur teoricamente, il comportamento dell'occhio. Attraverso la simulazione geometrica dell'occhio, gli scienziati del passato cercarono di scoprirne i meccanismi ottici che consentono la visione. I modelli che possono solo prevedere le proprietà di un sistema ottico con piccoli angoli e piccoli campi visivi sono chiamati occhi schematici parassiali, tra cui il modello più popolare è quello di Gullstrand.⁽⁴⁷⁾ I raggi incidenti, vicino all'asse ottico, tali da convergere sul fuoco senza errori apprezzabili sono detti raggi parassiali. L'assunzione dei questi raggi viene soddisfatta per l'occhio con diametro pupillare di 2mm.⁽⁴⁾ La maggior parte degli occhi schematici furono esaminati per fornire stime migliori di un occhio schematico parassiale rappresentativo per livelli medi di aberrazione sferica, errori di potenza, astigmatismo e illuminamento retinico. Con il passare degli anni furono studiati i modi in cui i modelli parassiali potevano essere migliorati per rappresentare in modo più accurato gli occhi reali. Tutti gli occhi schematici parassiali hanno superfici sferiche, ma le superfici degli occhi reali non sono sferiche, per questo recenti studiosi hanno utilizzato più frequentemente nell'ottica convenzionale la superficie asferica che è la conoide (curva come la superficie di una conchiglia). L'equazione di questa superficie è data da:⁽⁴⁸⁾

$$h^2 + (1 + Q)Z^2 - 2ZR = 0$$

Dove Z indica l'asse ottico, R il raggio del vertice di curvatura, Q l'asfericità superficiale, $h^2 = X^2 + Y^2$.

Molti ricercatori hanno utilizzato varie equazioni per descrivere la forma corneale e contrariamente alla superficie corneale anteriore, quella posteriore non ha

attirato molta attenzione, infatti è trascurata nei modelli oculari semplificati. Ciò è generalmente giustificato dal fatto che ha una potenza molto inferiore rispetto alla superficie anteriore, inoltre è difficile misurare con precisione la forma di questa superficie perché essendo vicinissima a quella anteriore, la sua forma apparente è influenzata dalla forma di quest'ultima. Per quanto riguarda la forma del cristallino è stata soggetta di molti studi, probabilmente c'è una grande variazione nei valori dell'asfericità delle superfici. L'indice di rifrazione di tutti i mezzi oculari ad eccezione del cristallino può essere considerato uniforme, infatti è noto da oltre 100 anni che il cristallino ha un indice di rifrazione variabile. Infine, rispetto a molti altri parametri oculari, la forma della retina non è stata ampiamente studiata poiché non è facile analizzarla con facilità.⁽⁴⁸⁾

Il primo fisico che costruì il primo occhio schematico fu Huygens (1629-1695). Egli realizzò un occhio schematico ridotto costituito da due emisferi, la cornea e la retina, pensando fossero pieni di acqua. Inoltre, l'emisfero retinico aveva un raggio di curvatura tre volte superiore a quello corneale.⁽⁴⁹⁾ Fu a partire dal XIX secolo che diversi fisici svilupparono una serie di occhi schematici che offrirono diversi livelli di semplicità o complessità, dalla versione ridotta più semplice che consiste in una singola superficie rifrangente al modello complesso con quattro superfici asferiche.⁽⁵⁰⁾ Fu nel 1818, in un'opera di Soemmering, che vennero proposti dei modelli diversi della struttura oculare dei vertebrati. A oltre un secolo e mezzo dalla loro pubblicazione, questi modelli sollevarono ancora una serie di domande sul funzionamento dell'occhio in merito alla varietà di forme e dimensioni.⁽⁵¹⁾ Tra questi modelli ricordiamo quello di Moser (1844) che descrisse il primo occhio schematico teorico ma non ebbe successo poiché un errore nell'indice lo rese troppo ipermetrope. Nel 1851 Listing rappresentò due modelli di occhio: un occhio schematico con una singola superficie corneale e un occhio ridotto. Helmholtz-Laurance, invece, ne descrisse uno con tutte le superfici che si trovano nell'occhio biologico. Tra il 1920 ed il 1952, Gullstrand, Le Grand ed Emsley produssero vari modelli sempre più realistici. L'oftalmologo svedese Gullstrand condusse delle ricerche proponendo un modello di occhio schematico definito "esatto" e uno "semplificato". Egli vinse il premio nobel con il suo occhio schematico. Le Grand fu importante per il suo occhio teorico con il quale egli rappresentò una ragionevole media dei valori dell'occhio dell'uomo europeo

adulto rappresentandolo con 4 superfici. Ma uno dei più semplici modelli oculari fu quello di Emsley in quanto modificò l'occhio di Gullstrand e introdusse un nuovo occhio ridotto contenente una sola superficie refrattiva. Bennet e Rabbetts perfezionarono ulteriormente i modelli precedenti riformulandone le dimensioni in base a valutazioni statistiche più ampie descrivendo un nuovo occhio schematico e nuovo occhio ridotto.⁽⁴⁷⁾ Nel 1971 Lotmar modificò l'occhio teorico di Le Grand rendendo asferica la superficie anteriore della cornea e sostituendo la superficie sferica posteriore del cristallino con una paraboloide. In questo modo determinò l'aberrazione sferica e l'astigmatismo del suo modello. Anche Kooijman (1983) ha modificato il modello di occhio teorico allo scopo di prevedere l'illuminazione della retina. Questo occhio schematico presentava entrambe le superfici corneali con un valore di asfericità di -0,25, invece la superficie anteriore del cristallino, iperbolica, con un valore di -3,06, e quella posteriore, parabolica, di -1.⁽⁴⁸⁾

I modelli di Liou e Brennan, e Navarro sono gli esempi più popolari poiché offrono buone previsioni per le aberrazioni. La proposta di Thibos e i suoi collaboratori di un modello semplificato, con una singola superficie, raggiunse una certa misura di successo, poiché prevedeva con precisione sia le aberrazioni sferiche che cromatiche dell'occhio.⁽⁴⁾ Tuttavia, l'occhio ridotto e semplificato è limitato in termini di capacità di rappresentare veramente la visione del mondo reale poiché è difficile considerare il tipo di variazione nelle superfici rifrattive che si verifica naturalmente. Nel tentativo di perfezionare sempre di più un modello di occhio, alcuni studiosi inclusero i cambiamenti di accomodazione riproducendo le proprietà del modello di Navarro. Questi modelli riprendevano però dei valori umani medi e quindi le loro previsioni risultavano inaccurate per i singoli occhi reali, per questo Navarro e suoi collaboratori hanno recentemente proposto la produzione di modelli oculari personalizzati utilizzando dati derivati in modo univoco per ciascun individuo.⁽⁴⁷⁾

3.1 Occhio schematico esatto di Gullstrand

Il primo che sviluppò un occhio schematico capace di poter calcolare il potere diottrico dell'occhio fu Gullstrand. Egli realizzò un modello di occhio schematico "esatto", noto anche come modello numero 1, composto da 6 superfici rifrattive, 2 corneali e 4 del cristallino.

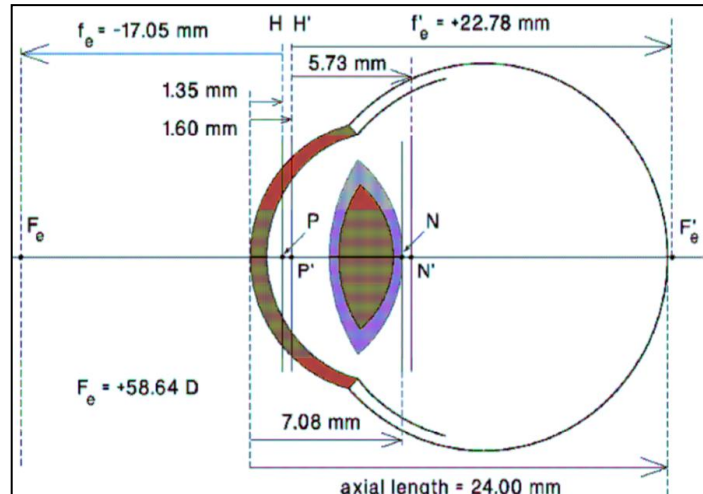


FIGURA 3.1: Occhio schematico di Gullstrand detto "esatto"

Questo modello prevede sia la versione con il cristallino accomodato che rilassato. Il cristallino viene rappresentato come un nucleo centrale di forma biconvessa ($r_1 = +7,91 \text{ mm}$ e $r_2 = -5,76$) avente indice di rifrazione uguale a 1.406, circondato da una corteccia sempre a forma di lente biconvessa ($r_1 = +10,00 \text{ mm}$ e $r_2 = -6,00$) con indice di rifrazione $n = 1,386$. Il processo accomodativo produce una diminuzione notevole del raggio di curvatura anteriore del cristallino (-46%) e una conseguente diminuzione della distanza tra le due lenti (cornea, cristallino).⁽⁵²⁾ I raggi di curvatura dell'occhio accomodato e non, sono indicati nella Tabella II assieme agli indici di rifrazione dei mezzi rifrangenti. Inoltre, questo modello presenta una lunghezza assiale di 24 mm, un potere uguale a +58,64 D, e sei piani cardinali. I due piani focali si trovano rispettivamente davanti all'occhio (F_e) e nella retina (F'_e), i due piani principali strettamente vicini nel mezzo della camera anteriore (H e H') e i due piani nodali (N e N') proprio di fronte al polo posteriore della lente.⁽⁵³⁾ (Figura 3.1)

TABELLA II: indici di rifrazione dei mezzi rifrangenti e raggi di curvatura delle 6 superfici dell'occhio schematico di Gullstrand.

	Raggi di curvatura		Indici di rifrazione
	Occhio non accomodato	Occhio accomodato	
			$n_1 = 1,000$
Faccia anteriore cornea	7,70 mm	7,70 mm	
			$n_2 = 1,376$
Faccia posteriore cornea	6,80 mm	6,80 mm	
			$n_3 = 1,336$
Faccia anteriore corteccia cristallino	10,00 mm	5,33 mm	
			$n_4 = 1,386$
Faccia anteriore nucleo cristallino	7,91 mm	2,66 mm	
			$n_5 = 1,406$
Faccia posteriore nucleo cristallino	-5,76 mm	-2,66 mm	
			$n_6 = 1,386$
Faccia posteriore corteccia cristallino	-6,00 mm	-5,33 mm	
			$n_7 = 1,336$

Il modello viene definito “esatto” poiché approssima tutti gli elementi refrattivi con superfici sferiche simili, il più possibile, a quelle dell'occhio umano, infatti Gullstrand fornì l'esatta posizione dei piani cardinali del sistema ottico dell'occhio. Questi modelli richiedono come minimo quattro superfici rifrattive, due per la cornea e due per il cristallino. Il modello schematico di Gullstrand ha una buona approssimazione delle dimensioni dell'occhio medio. È un occhio ipermetrope (+1.00D) con fuoco 0.39 dietro la retina.⁽⁴⁾ Usando calcoli basati sul modello dell'occhio schematico di Gullstrand è stato possibile determinare la prevalenza di errori di refrazione. A questo proposito alcuni studiosi hanno fatto degli esperimenti sulla popolazione slovacca accorgendosi che questo modello aumentava il numero degli ipermetropi. I dati necessari sono stati ottenuti utilizzando il biometro ottico Lenstar LS900, invece non è stato possibile ottenere altri dati a causa delle limitazioni del dispositivo e quindi sono stati sostituiti dai dati teorici del modello dell'occhio schematico di Gullstrand. Il loro campione comprendeva 1663 pazienti (665 maschi, 998 femmine) di età compresa tra 19 e 96 anni. L'89,06% del campione era ipermetrope, il 6,61% era miope e il 4,33% emmetrope. In conclusione, secondo la loro stima, i calcoli degli errori di refrazione usando il modello di occhio schematico di Gullstrand hanno mostrato un significativo spostamento ipermetrope di oltre + 2D.⁽⁵⁴⁾

3.2 Occhio schematico semplificato di Gullstrand

Il modello semplificato, chiamato anche modello numero 2, è costituito da 3 superfici refrattive: riduce la cornea a una singola superficie, e il cristallino considerato omogeneo ($n=1.416$, aumentato per compensare la perdita di convergenza dei diottri negativi) a due curvature opportunamente scelte in modo che la sua potenza equivalente sia pressoché uguale a quella media del cristallino reale.⁽¹⁹⁾ Il modello viene quindi definito “semplificato” poiché appunto riduce le superfici refrattive, la cornea viene ridotta a un’unica superficie e il cristallino viene schematizzato con un indice di rifrazione uniforme.

Nella sua condizione statica l’occhio semplificato ha una potenza di $+59,60$ D, e si tratta di un occhio emmetrope. I due punti principali del sistema sono vicinissimi tra di loro e vicini al centro della camera anteriore, i due punti nodali, invece, si trovano sulla faccia posteriore del cristallino, il primo appena dentro e il secondo appena dietro il cristallino. Dato che i due piani principali ma anche i due piani nodali sono molto vicini tra loro, si può considerare un solo piano principale e un singolo piano nodale.⁽⁵³⁾ (Figura 3.2)

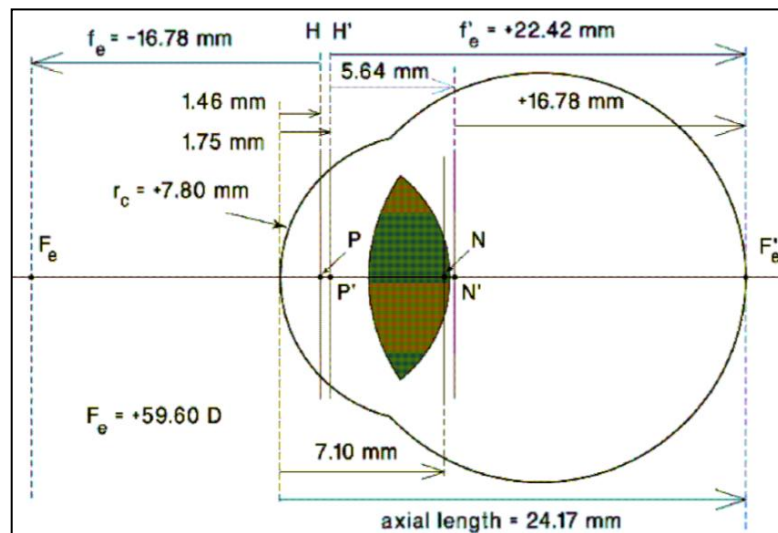


FIGURA 3.2: occhio schematico semplificato di Gullstrand.

I raggi di curvatura dei tre mezzi rifrattivi sono, rispettivamente, quello della cornea di 7,80 mm, quello anteriore del cristallino di 10 mm e il posteriore di 6 mm quando l'occhio non è accomodato. Quando l'occhio accomoda, la superficie anteriore del cristallino diventa più curva e il suo raggio si accorcia avendo la capacità di passare da 10,00 a 5,00 mm. Perciò il cristallino modifica la sua potenza equivalente passando da +20,28 a +30,13 D. Il risultato è quello di variare la potenza equivalente dell'intero occhio da +59,60 a +68,22 D, cioè una differenza di 8,62 D.⁽¹⁹⁾⁽⁵²⁾ Inoltre, l'occhio semplificato di Gullstrand presenta una lunghezza assiale di 24,17 mm. Altri dati sono indicati nella tabella III.

Tabella III: Occhio schematico semplificato di Gullstrand. La seconda colonna ci mostra i dati di un occhio che è disaccomodato mentre la terza colonna ci mostra un occhio accomodato di una quantità arbitraria di 8,26 D.

		Non accomodato	Accomodato
Raggi di curvatura	Cornea	+ 7,80 mm	+ 7,80 mm
	Cristallino anteriore	+ 10,00 mm	+ 5,00 mm
	Cristallino posteriore	- 6,00 mm	- 5,00 mm
Indici di rifrazione	Acqueo	1,336	
	Vitreo	1,336	
	Cristallino	1,413	
Potenze delle superfici	Cornea	+ 43,08 D	+ 43,08 D
	Cristallino anteriore	+ 7,70 D	+ 15,40 D
	Cristallino posteriore	+ 12,83 D	+ 15,40 D
Potenze equivalenti	Cristallino	+ 20,28 D	+ 30,13 D
	Occhio	+ 59,60 D	+ 68,22 D
Lunghezza focale equivalente	Anteriore	- 16,78 mm	- 14,66 mm
	Posteriore	+ 22,42 mm	+ 19,58 mm

3.3 Occhio ridotto di Emsley

Quando sono necessari semplici calcoli, ad esempio la stima delle dimensioni dell'immagine sulla retina oppure la posizione dei fuochi coniugati, è possibile utilizzare i modelli di occhio "ridotto" nei quali le semplificazioni sono ancora più "forti". L'occhio ridotto di Emsley è l'occhio più usato nel campo dell'ottica oftalmica.

Emsley propose un'ulteriore semplificazione modificando l'occhio schematico semplificato di Gullstrand. Il nuovo modello di occhio ridotto comprendeva un solo diottra equivalente al comportamento rifrattivo finale di tutto il sistema ottico dell'occhio. Dunque rappresenta una sola superficie refrattiva che è la cornea, e non raffigura più il cristallino. Un limite importante di questo modello è infatti l'analisi dell'accomodazione. La cornea è situata a 1,67 mm dietro la superficie anteriore di quella dell'occhio schematico di Gullstrand. (Figura 3.4) Inoltre, Emsley stabilì di far coincidere i punti focali anteriore e posteriore dell'occhio ridotto con quelli dell'occhio schematico. La pupilla si trova sul piano della superficie ridotta.⁽⁵⁵⁾ (Figura 3.3)

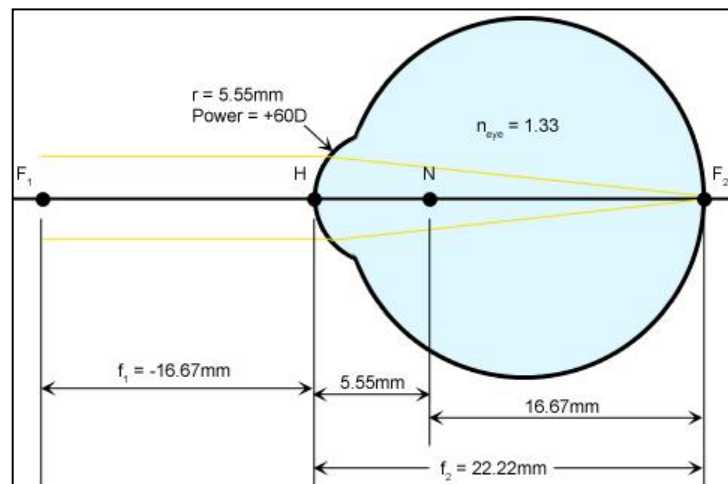


Figura 3.3: Occhio ridotto di Emsley

Il modello rappresenta un occhio emmetrope, e per poter mantenere un potere simile agli occhi più complessi, ne consegue una riduzione nel raggio di curvatura

della cornea e della lunghezza totale. Il potere totale del diottro è di +60D, e ha un solo indice di rifrazione equivalente di 1,333. La lunghezza assiale non è di 24 mm (occhio normale) ma è ridotta a 22,22 mm. Per calcolare le due focali dell'occhio ridotto si usa la formula tradizionale che lega P (potere), f (focale) e n di un diottro: ⁽³⁸⁾ $P = \frac{n}{f}$

$$\text{Focale anteriore: } f = -\frac{1}{60 D} = -16,67 \text{ mm}$$

$$\text{Focale posteriore: } f' = \frac{1,333}{60 D} = 22,22 \text{ mm}$$

Il rapporto tra le lunghezze focali è uguale a quello tra gli indici di rifrazione usati, ovvero:

$$\frac{\text{lunghezza focale posteriore}}{\text{lunghezza focale anteriore}} = \frac{1,333}{1} = \frac{4}{3}$$

Il raggio della cornea, invece, si calcola con la seguente formula:

$$R = \frac{n' - n}{P} = \frac{1,333 - 1}{60 D} = 5,55 \text{ mm}$$

Anche il raggio corneale è minore del raggio che si ha nell'occhio medio (< 7,7 mm).⁽²³⁾

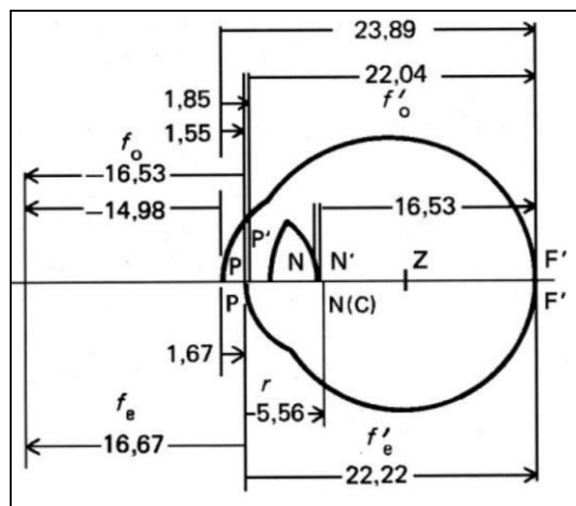


Figura 3.4: confronto tra l'occhio schematico di Gullstrand (in alto) e l'occhio ridotto di Emsley (in basso).

3.4 Occhio schematico di Navarro

Navarro e colleghi nel 1985 presentarono un modello di occhio con 3 superfici asferiche, con un indice di rifrazione del cristallino costante e con un sistema accomodativo di tipo adattativo, e inoltre rappresentarono la retina curva con un raggio di -12 mm. Il modello parassiale di base preso in considerazione fu l'occhio schematico di Le Grand, a eccezione del raggio corneale anteriore poiché presentarono la superficie anteriore della cornea e le superfici del cristallino con una forma conoidale. L'asfericità, lo spessore e l'indice di rifrazione del cristallino e la profondità della camera anteriore variavano in funzione all'accomodazione. Si accorsero infatti che l'aberrazione sferica diminuiva con l'accomodazione e che arrivava a un valore zero quando l'accomodazione era di 5 D fino a circa 2 mm di altezza della pupilla.⁽⁴⁸⁾ Navarro non considerò più un solo raggio che arrivava nell'occhio, ma riuscì a calcolare la dispersione cromatica. Il modello di Navarro concorda bene con i risultati sperimentali per le proprietà di aberrazione sia sull'asse che fuori asse dell'occhio reale.⁽⁴⁷⁾ Si tratta di un modello simmetrico in senso rotazionale. In un'indagine fu progettato l'occhio schematico di Navarro per studiare, appunto, le caratteristiche ottiche fuori asse dell'occhio umano, e gli studiosi si resero conto che quest'ultimo consentiva la valutazione delle prestazioni di dispositivi oftalmici ad ampio campo.⁽⁵⁶⁾

3.5 Modello di Liou e Brennan

Storicamente, numerosi occhi schematici furono usati per valutare la refrazione ottica dell'occhio umano, tra cui Gullstrand-Emsley, Liou-Brennan, Navarro e altri modelli di occhi schematici. In particolare, il modello di Liou-Brennan è uno tra gli occhi schematici più complessi per alcuni aspetti fisiologici come la forma conoide della superficie corneale e del cristallino, la distribuzione di un indice di gradiente della lente e il decentramento e lo spostamento della pupilla, infatti viene spostata di 0,5 mm dall'asse verso il lato nasale, e l'angolo ottico tra asse visivo e asse ottico nello spazio oggetti risultava di 5°. Lo scopo principale di questo modello di occhio schematico era quello di modellare l'aberrazione sferica

degli occhi reali prevedendo che avesse livelli normali di aberrazione cromatica.⁽⁴⁸⁾

Il modello di Liou e Brennan è l'occhio che si avvicina di più all'anatomia degli occhi umani, ovvero si avvicina alla realtà dal punto di vista anatomico, ottico e biologico, poiché tiene conto del valore medio delle misurazioni empiriche dei parametri oculari provenienti da occhi emmetropi sani. Questo è stato confermato da diversi studi: un'indagine del 2008 in cui dei fisici, tra cinque modelli selezionati, hanno trovato nel modello di Liou-Brennan una corrispondenza più stretta con i dati reali dell'occhio soprattutto negli aspetti delle aberrazioni sferiche corneali e anche in alcuni profili di rifrazione;⁽⁴⁷⁾ di conseguenza in un altro studio, hanno riportato sempre lo stesso risultato, ovvero che il modello di Liou-Brennan simula le superfici asferiche e gli indici di rifrazione dei veri occhi umani.⁽⁵⁷⁾

Considerando i diversi indici dell'occhio schematico di Liou e Brennan (Tabella IV) notiamo difatti che alcune misure si avvicinano di più all'occhio reale. Un esempio è la cornea che presenta un raggio di 7,77 mm, uno spessore di 0,50 mm e un indice di rifrazione di 1,376, valori molto simili o addirittura uguali alla realtà.

Tabella IV: parametri dell'occhio schematico di Liou e Brennan

Surface	Radius [mm]	Asphericity	Thickness [mm]	Refractive index	Medium
1	7.77	-0.18	0.50	1.376	Cornea
2	6.40	-0.60	3.16	1.336	Aqueous
3	12.40	-0.94	1.59	Grad A	Lens
4	∞	-	2.43	Grad P	Vitreous
5	-8.10	0.96	16.27	1.336	Retina

3.6 Occhio ridotto di Thibos

Thibos e i suoi collaboratori hanno sviluppato un occhio schematico ridotto basandosi su quello di Emsley. Il modello prevedeva l'asfericità delle superfici e la posizione della pupilla a 1,91 mm dalla cornea in modo che la pupilla d'ingresso si trovasse a una distanza simile dal punto nodale come nei modelli più sofisticati. Inoltre, hanno misurato un'aberrazione cromatica longitudinale simile a quella degli occhi reali. Successivamente, assieme ad altri colleghi, ha sviluppato un secondo occhio schematico chiamato "Indiana eye".⁽⁴⁸⁾ Quest'ultimo prevedeva una singola superficie dell'aberrazione cromatica oculare per tenere conto dell'aberrazione sferica dell'occhio, infatti questo modello poteva avere aberrazione sferica positiva o negativa di vario grado, a seconda del valore numerico del parametro di forma. Un parametro di forma di circa $p = 0,6$ ha fornito il miglior adattamento del modello ai dati selezionati dalla letteratura.⁽⁵⁸⁾ Wang e Thibos hanno affermato che era possibile ottenere livelli ragionevoli sia di aberrazione sferica che di astigmatismo periferico, tuttavia il modello non offriva alcun controllo sul coma o sul potere sagittale e tangenziale dell'occhio. Dunque, il modello asferico dell'occhio ridotto è in grado di spiegare simultaneamente le aberrazioni astigmatiche cromatiche, sferiche e oblique che si trovano tipicamente negli occhi umani. Studiosi, infatti, hanno mostrato che la quantità di astigmatismo varia in modo significativo con la forma della superficie di rifrazione e con la posizione assiale della pupilla. Per una pupilla situata a 1,91 mm dall'apice della superficie di rifrazione, l'intervallo di Sturm calcolato era maggiore di quello riportato in letteratura. Tuttavia, spostando la pupilla del modello di 0,84 mm assialmente dall'apice verso il punto nodale, è stata raggiunta una corrispondenza ravvicinata tra l'intervallo di Sturm del modello e i dati pubblicati dagli occhi umani per eccentricità fino a 60° .⁽⁵⁹⁾

3.7 Confronto e limiti degli occhi schematici

Durante le loro ricerche sulla scienza della visione, molti studiosi si sono affidati ai modelli ottici dell'occhio. Le loro ragioni per lo sviluppo e l'utilizzo di questi includono molte applicazioni. Oltre a mostrare la struttura ottica di base

dell'occhio, le dimensioni e altri parametri oculari consentono di tracciare i raggi attraverso l'occhio e determinare la posizione, le dimensioni e l'orientamento delle immagini, e valutare le aberrazioni e quindi la qualità dell'immagine retinica.⁽⁵⁰⁾ Sono utili nel fornire informazioni sulle proprietà ottiche dell'occhio incluso il cambiamento di rifrazione o accomodazione. Gli occhi schematici accomodati potrebbero essere di grande interesse perché spiegano la funzionalità dell'occhio umano e sono facili da usare ai fini della ricerca.⁽⁶⁰⁾ Per studiare un occhio schematico si assume che: le superficie rifrattive sono sferiche e sono tutte centrate sullo stesso asse ottico; gli indici di rifrazione sono costanti in ciascun mezzo; l'asse visivo coincide con l'asse ottico. Per questo, nei modelli parassiali, possiamo ricavare delle informazioni sul calcolo della superficie e poteri equivalenti della cornea, del cristallino e altri parametri ottici come punti cardinali e posizioni della pupilla d'entrata e d'uscita, oppure fare una previsione dell'errore refrattivo, ma non sono utili per calcolare l'aberrazione sferica o altre aberrazioni. In un esperimento, alcuni studiosi hanno costruito gli occhi schematici parassiali a partire da parametri misurati dalla biometria oculare in diversi soggetti giovani, utilizzando inoltre la variazione accomodativa media della popolazione. Hanno calcolato la loro rifrazione e l'hanno confrontata con quella misurata con l'autorefrattometro. Si sono resi conto che, sebbene con lo strumento era possibile ottenere risultati leggermente migliori, anche con un solo disegno di occhio schematico si riusciva a valutare la loro rifrazione.⁽⁶¹⁾ Uno studio del 2015 conferma quanto appena affermato. Alcuni ricercatori hanno sviluppato degli occhi schematici parassiali a tre superfici in base ai dati raccolti in bambini cinesi dai 7 ai 14 anni. Sono stati ideati 6 occhi parassiali, modelli oculari dipendenti sia dalla rifrazione che emmetropici. Hanno osservato che i cambiamenti in questi occhi schematici con l'invecchiamento erano: aumento della profondità della camera anteriore, riduzione dello spessore della lente, aumento della profondità della camera vitrea, aumento della lunghezza assiale e riduzione della potenza equivalente della lente. In questo modo si sono resi conto quanto tali modelli fossero utili per la ricerca sulla miopia e per facilitare il confronto con altri bambini che vivono in luoghi diversi.⁽⁶²⁾

Dato che i modelli parassiali prevedono scarsamente le aberrazioni oculari, verrà presa in considerazione la costruzione di occhi schematici più precisi, più

realistici. A differenza dei modelli parassiali, i modelli oculari più realistici non hanno gli stessi limiti poiché le superfici dell'occhio in realtà non sono perfettamente sferiche, non sono allineate a un comune asse e presentano degli indici di rifrazione diversi. In generale, gli occhi schematici non parassiali possono essere utili nella progettazione di impianti intraoculari e per la chirurgia refrattiva personalizzata ma soprattutto per comprendere le variazioni di qualsiasi struttura oculare dovute alle aberrazioni e quindi per studiare la qualità dell'immagine.⁽⁶³⁾ Non esistono equazioni semplici per il loro esatto calcolo dei parametri di sistema. Esistono utili, anche se approssimative, equazioni di aberrazione di Seidel. Queste equazioni sono più precise con la diminuzione della dimensione della pupilla e del campo, cioè quando i livelli di aberrazione diminuiscono. Sulla base di alcuni dati sperimentali, l'astigmatismo degli occhi schematici parassiali è approssimativamente il doppio di quello degli occhi reali, inoltre gli occhi parassiali sembrano essere precisi nel prevedere la posizione dell'immagine retinica fuori asse. Poco si può dire sul coma a causa della mancanza di dati sperimentali definitivi.⁽⁴⁸⁾

Possiamo fare un confronto sugli occhi schematici descritti sopra. Studiosi hanno analizzato e calcolato l'aberrazione sferica di diverse categorie di occhio schematico e confrontato i risultati calcolati con i dati sperimentali. I risultati mostrano che le aberrazioni sferiche degli occhi finiti sono notevolmente più piccole di quelle degli occhi parassiali e che gli occhi schematici finiti predicono i valori dell'aberrazione sferica più vicini ai dati sperimentali. Tuttavia solo l'occhio di Liou e Brennan ha il livello più basso di aberrazione sferica, che si avvicina ai valori reali dell'occhio. I modelli di Koijman, Navarro e colleghi hanno tutti livelli simili di aberrazione. Pur essendo inteso solo per la stima dell'aberrazione sferica, il modello di Liou e Brennan, (con un raggio di curvatura della retina di -12 mm) dà le migliori stime complessive delle aberrazioni monocromatiche medie di occhi reali. Il coma è simile sia per i modelli di occhio parassiale che per quelli non parassiali, tranne per il fatto che gli occhi di Thibos e collaboratori hanno livelli estremamente alti, e l'occhio di Liou Brennan ha livelli estremamente bassi.⁽⁶⁴⁾ Il risultato del calcolo dell'astigmatismo nei diversi occhi schematici è simile per gli occhi reali e parassiali con un coefficiente più alto di circa di 2-5 volte per gli occhi schematici rispetto agli occhi reali. L'occhio di

Lotmar fornisce un'eccellente stima dell'astigmatismo, e gli occhi di Liou-Brennan e Navarro forniscono stime ragionevoli. Inoltre, errori di potenza sagittale e tangenziale sono sensibili alla forma retinica. I modelli reali sono generalmente migliori dell'occhio numero 1 di Gullstrand per stimare errori di potenza tangenziali medi ma non per stimare errori di potenza sagittali medi. Gli occhi di Lotmar, Navarro e di Liou e Brennan hanno stime ragionevoli di entrambi questi errori. I valori dell'occhio di Kojman sia per quanto riguarda i poteri sagittali che tangenziali sono troppo positivi.⁽⁴⁸⁾

Una delle domande che possiamo proporci è: “Qual è il modello migliore da utilizzare?” Alcuni potrebbero pensare che i modelli parassiali devono essere sostituiti da modelli più reali, modelli più anatomicamente corretti, per spiegare al meglio i fenomeni ottici della visione, le rifrazioni e le aberrazioni. Tuttavia, la crescente complessità dei modelli potrebbe rendere più difficile il loro utilizzo, per questo spesso si usa il modello più semplice che è adeguato per un'applicazione. Questo può essere un modello funzionalmente accurato ma anatomicamente inaccurato. Segue un caso di studio che dimostra quanto appena affermato. Un soggetto, a seguito di una vitrectomia (asportazione del corpo vitreo) notava dei cambiamenti quando indossava gli occhiali, vedeva delle macchie che si muovevano con leggeri movimenti, questo perché era stato trasformato in un miope. Per capire il problema del soggetto utilizzarono il classico occhio schematico a 4 superfici.⁽⁴⁹⁾ In questo caso non è stato necessario asferizzare le superfici, inclinare le superfici, includere un indice di gradiente per dimostrare il fenomeno in atto, ma hanno utilizzato un modello più schematico, un modello parassiale.

CAPITOLO 4

MODERNI OCCHI SCHEMATICI

La comprensione del sistema ottico si sta evolvendo abbastanza rapidamente grazie alle nuove metodologie sperimentali e modelli avanzati. Il progetto di un sistema ottico, tramite software, svolge un ruolo centrale in questo settore, poiché questo ramo della scienza e della tecnologia si occupa di trovare le migliori combinazioni di elementi ottici per ottenere la funzione desiderata, con prestazioni ottimali. L'integrazione dei computer nella società ha portato risultati più innovativi e specializzati, infatti l'attuale tecnologia oftalmica consente la manipolazione dei componenti oculari, come cornea e cristallino, dell'occhio umano con notevole precisione e personalizzazione. Oggi sono disponibili software per progettare e simulare praticamente qualsiasi caratteristica meccanica o ottica di un modello di occhio al fine di prevedere le prestazioni ottiche, ma anche di produrre e studiare nuovi articoli prima che vengano lanciati nella linea di produzione. Dunque, grazie ai nostri computer moderni è possibile realizzare e modellare, attraverso delle soluzioni matematiche e fisiche, una simulazione quasi realistica dell'occhio umano nel miglior dettaglio.

4.1 Progettare un sistema ottico

Gli specialisti moderni sono capaci di progettare un sistema ottico nel proprio computer. Esistono in commercio dei software di progettazione che si possono acquistare. Uno di questi è OpticStudio, programma di progettazione ottica comunemente usato per Microsoft Windows ed è il prodotto di punta della società Zemax. OpticStudio combina fisica complessa ed effetti visivi interattivi in modo da poter analizzare, simulare e ottimizzare sistemi ottici, sistemi di illuminazione e anche sistemi laser, il tutto entro le specifiche di tolleranza.

Esso funziona mediante il ray tracing¹, modellando la propagazione dei raggi attraverso un sistema ottico. Il software riesce a modellare l'effetto di elementi ottici come lenti semplici, lenti asferiche, specchi ed elementi ottici diffrattivi e può produrre diagrammi di analisi standard come diagrammi a punti e diagrammi a raggi. Inoltre, è in grado di migliorare un design iniziale di un prodotto ottico regolando automaticamente i parametri per massimizzare le prestazioni e ridurre le aberrazioni. Ha anche una capacità tollerante per quanto riguarda i difetti di fabbricazione e gli errori di assemblaggio.⁽⁶⁵⁾

Zemax suggerisce di progettare un proprio sistema ottico, un prototipo virtuale ad alta sicurezza, in 5 step, utilizzando OpticStudio, includendo strumenti e procedure guidate di facile apprendimento che consentono una simulazione e una progettazione efficienti di qualsiasi sistema ottico. Dunque, il primo step è quello di configurare il proprio sistema, segue poi l'analisi di quest'ultimo per valutare le prestazioni. OpticStudio include molti strumenti per analizzare le prestazioni del sistema: oltre alle classiche funzioni di analisi, offre anche: analisi di aberrazione a campo pieno per migliorare i progetti a forma libera; analisi del contrasto per l'ottimizzazione di MTF (Modulation Transfer Function); e il comando "Image Simulation" che permette di produrre immagini foto-realistiche di scene di oggetti. Il terzo step attesta che bisogna ottimizzare il proprio sistema per soddisfare le specifiche di produzione. Gli strumenti di ottimizzazione migliorano automaticamente le prestazioni dei progetti in base a vincoli e obiettivi di progettazione definiti dall'utente. Ciò consente di risparmiare tempo. Lo step successivo indica di tollerare il sistema per garantire la producibilità. Gli strumenti avanzati incorporano i limiti di produzione e assemblaggio nei vincoli di progettazione per garantire la producibilità e l'efficienza della produzione. Infine, l'ultimo step precisa di personalizzare OpticStudio in base alle proprie esigenze, per esempio con il pulsante "ZOS-API" è possibile creare applicazioni autonome, e analisi personalizzate, con "Zemax Programming Language" (ZPL)

¹ Il ray tracing è una tecnica generale di geometria ottica utilizzata per la realizzazione di lenti e strumenti ottici: fotocamere, binocoli, telescopi e microscopi. Si basa sul calcolo del percorso fatto dalla luce, seguendone i raggi attraverso l'interazione con le superfici. Il ray tracing descrive anche un metodo per la produzione di immagini costruite in sistemi di computer grafica 3D, in cui le visualizzazioni delle scene, modellate matematicamente con maggior realismo solitamente da un programmatore o da un grafico, utilizzando particolari programmi, vengono prodotte usando una tecnica che segue i raggi partendo dal punto di vista della telecamera piuttosto che dalle sorgenti di luce.⁽⁶⁶⁾

si possono automatizzare i processi ripetitivi, e infine con “DLL” personalizzate è possibile realizzare qualsiasi superficie, oggetto e sorgente.⁽⁶⁷⁾

OpticStudio è stato usato in molti esperimenti. Esperti hanno utilizzato un occhio schematico a gradiente asferico, a fuoco variabile, dipendente dall'età, per studiare dove si verificano le aberrazioni oculari nell'occhio e come queste cambiano con l'accomodazione e con l'età. La tracciabilità dei raggi ottici è stata effettuata utilizzando proprio questo software. I risultati hanno stabilito che la principale fonte di alterazione dell'aberrazione può essere attribuita alla distribuzione dell'indice di gradiente della lente.⁽⁶⁸⁾ Si ha la conferma che la nuova tecnologia apre la possibilità di sfruttare alcune caratteristiche dell'occhio al fine di migliorare i metodi di correzione delle aberrazioni ottiche. I progressi nelle tecnologie oftalmiche offrono ora sia la misurazione che la riduzione delle aberrazioni oculari. Lo stesso software è stato utilizzato per studiare il comportamento di diversi modelli di occhio umano tra cui quello di Helmholtz-Laurance, di Gullstrand, di Emsley, e di Liou-Brennan. Un attento confronto della funzione di trasferimento di modulazione (MTF) tra i diversi modelli mostra la differenza nella qualità dell'immagine: i primi occhi schematici producono immagini di qualità superiore, invece il modello di Liou e Brennan non ha la miglior MTF, ma come sappiamo è quello che più si avvicina all'occhio umano in vivo. Pertanto, in applicazioni come la ricerca o lo sviluppo di prodotti per la vista viene consigliato questo modello, ma per applicazioni che non richiedono prestazioni limitate alla rifrazione, la maggior parte degli altri modelli dovrebbero dare una migliore approssimazione.⁽⁶⁹⁾

Un altro software, importante per la modellizzazione degli occhi, che ha mostrato validità grazie alla somiglianza con il software OpticStudio, è Advanced Human Eye Model (AHEM). Quest'ultimo è un software di facile utilizzo, disponibile in commercio, della Breault Research Organization (BRO). Viene utilizzato con Advanced Systems Analysis Program (ASAP) per modellare la propagazione della luce in modelli di occhio umano accurati e stereoscopici. Più specificamente, AHEM è un sistema binoculare personale di modellizzazione dell'occhio, comprendente rifrazione, diffrazione e dispersione. Lo scopo di questo software è di: progettare e creare modelli oculari per aiutare lo sviluppo dell'ottica e della

strumentazione oftalmica; simulare disturbi o cambiamenti indotti dalla chirurgia; esplorare domande di ricerca sulla visione; e fornire assistenza ai medici nella pianificazione del trattamento o nell'analisi dei risultati clinici. Poiché le persone generalmente vedono con due occhi, un modello binoculare integrato in un sistema visivo aggiunge un alto livello di realismo.⁽⁷⁰⁾

I due software ottici tradizionali, OpticStudio e AHEM, sono stati usati per costruire un modello di occhio simile, per poi confrontarli. Vennero creati vari scenari di modellazione oculare come: immagine retinica, capacità di ottimizzazione, occhiali, lenti a contatto, e inserimento e correzione di lenti intraoculari, ed esplorazione del percorso del raggio. Si resero conto che i risultati erano abbastanza simili e, quindi, dedussero che i due software sono validi per lo studio di modelli oculari.⁽⁷¹⁾

4.2 Esempi di modelli oculari

Un'importante linea di ricerca nello studio di modelli oculari riguarda la simulazione dei processi visivi. Fortunatamente, una serie di modelli schematici dell'occhio sono buoni candidati a modellare le proprietà complicate dell'occhio umano. La simulazione della visione umana può trovare il suo potenziale valore in molte applicazioni, come ad esempio la nuova combinazione di lenti, il design delle lenti a contatto, il design degli occhiali e così via. Dunque, i modelli oculari possono essere utilizzati per simulare le prestazioni ottiche dell'occhio, e per sviluppare e valutare correzioni ottiche progettate per migliorare la qualità dell'immagine della retina. Inoltre, oggi, è necessario usare modelli oculari perché sono strumenti utili per studiare e simulare i processi visivi, e permettono di migliorare e svolgere calcoli sulla refrazione e sull'aberrazione, e aiutano nella progettazione di correzioni ottiche come lenti a contatto o intraoculari, e lenti asferiche che cercano di correggere l'aberrazione sferica dell'occhio. Pertanto, la costruzione di un modello oculare in grado di simulare le proprietà ottiche dell'occhio umano sarà significativa nelle ricerche ottiche e oftalmologiche.

Un esempio di modello oculare, un modello di occhio schematico asferico, viene proposto per simulare accuratamente la visione periferica in diverse percezioni visive. Questo modello di occhio prende come modello base quello di Navarro, con superfici asferiche. Al fine di simulare una visione umana accurata, è necessario visualizzare il modello in modo da acquisire una particolare forma geometrica, e inoltre viene usata la tecnica di ray tracing per sintetizzare le immagini retiniche dell'occhio umano, e per produrre una varietà di risultati visivi. Infine, come affermano gli studiosi, il modello di Navarro può essere utilizzato per simulare una percezione visiva in diversi stati di accomodazione.⁽⁷²⁾

Oltre a questo modello oculare, grazie ad altri studiosi e ai loro sforzi, sono stati costruiti modelli concreti di occhi che replicano le proprietà anatomiche e ottiche di un occhio umano medio, in grado di simulare correttamente le prestazioni ottiche dell'occhio umano. Un esempio di modello oculare è un occhio medio che incorpora i cambiamenti di tutti i parametri ottici con l'accomodazione e anche con l'età, incluso il diametro della pupilla d'ingresso, in condizioni fotopiche, naturali e ambientali. Il modello oculare proposto è in grado di prevedere i cambiamenti nella rifrazione con la risposta all'accomodazione. Ha il potenziale per essere un utile strumento di progettazione e un utile test per dispositivi (ad es. lenti intraoculari o lenti a contatto) progettati per correggere gli errori ottici dell'occhio. Gli studiosi affermano, basandosi su questo modello oculare, che man mano che l'occhio invecchia si avvicina sempre di più alla ipermetropia, mostrando una variazione di 0,22 D ogni 10 anni. Tuttavia, uno dei vantaggi di questo modello è che queste condizioni possono essere modificate al fine di studiare altre situazioni con differenti condizioni di luminanza e campo visivo.⁽⁷³⁾

Un'applicazione pratica di modello oculare avviene con "l'occhio di prova". La schiascopia è una fase necessaria durante l'analisi visiva optometrica di routine. La conoscenza di questo esame è di importanza decisiva, non solo per lo studente che vuole comprendere le basi del metodo per poterlo praticare, ma anche per l'optometrista specializzato che desidera migliorare la sua conoscenza sulla formazione delle immagini sulla retina e su come si esternano per raggiungere l'occhio dell'osservatore. L'occhio di prova è utile per fare pratica di schiascopia, ma anche di oftalmoscopia, permette di sviluppare la tecnica effettuandola a lungo

e in varie modalità. Questo modello oculare, che può essere di metallo o di materiale plastico, è composto da una lente convergente, da un diaframma e da una retina disegnata sul fondo; due cilindri slittano uno dentro l'altro in modo da simulare diverse condizioni rifrattive. L'utilizzo di questo dispositivo è molto semplice: ci si pone con lo strumento a una distanza nota (50 o 66 cm), si regola una dimensione della pupilla d'ingresso, si muove l'apposito regolatore per selezionare l'ametropia da simulare, si punta il fascio nella pupilla d'ingresso e, infine, si esegue la schiascopia facendo uso di lenti della cassetta di prova o delle stecche per schiascopia per la ricerca del neutro. Si possono così simulare i diversi comportamenti relativi ai raggi luminosi riflessi dalla retina ed emergenti dalla pupilla: quando l'occhio è posizionato nella posizione di emmetropia, la luce riflessa esce dirigendosi al suo punto remoto, situato all'infinito; quando l'occhio è posizionato nella posizione di miopia, la luce riflessa esce convergendo verso il suo punto remoto reale, situato a distanza finita; infine, quando l'occhio è posizionato nella posizione di ipermetropia, la luce riflessa esce divergendo come se provenisse dal suo punto remoto virtuale, situato posteriormente all'occhio di prova. Esercitandosi con l'occhio di prova si può simulare anche la condizione astigmatica antepoendo una lente cilindrica nell'apposito alloggiamento, che se è pianoconvessa realizza un astigmatismo miopico semplice, mentre se è pianoconcava realizza un astigmatismo ipermetropico semplice.⁽⁷⁴⁾

4.3 Prospettive future

Nonostante la ricerca attiva e progressi significativi negli ultimi 30 anni, la rilevazione e il tracciamento degli occhi rimangono difficili a causa dell'individualità degli occhi, della variabilità della posizione e delle condizioni di luce. Progressi attuali e ricerche continue permettono di identificare tecniche e questioni da affrontare ulteriormente. La sfida tecnologica sta spingendo i laboratori del mondo informatico verso la ricostruzione di mondi cosiddetti "virtuali". Grazie a sistemi di interfaccia hardware e software, l'uomo viene collocato in veri e propri ambienti artificiali, in cui riceve sensazioni e compie movimenti molto simili a quelli che compirebbe in ambienti esistenti, un vero e

proprio simulatore della realtà. Grazie all'invenzione di ricercatori e studiosi moderni, esiste un "Simulatore di Realtà Visiva" (SRV) che viene utilizzato per l'analisi delle immagini dell'occhio umano, con il quale si è in grado di vedere "quello che l'occhio effettivamente vede" o di ricostruire, tenendo conto delle aberrazioni dell'occhio, una scena che un individuo sostiene di aver visto. Questa nuova tecnica di indagine visiva ha attualmente dei limiti che si prevede saranno rapidamente superati nel tempo, poiché attualmente, l'SRV può essere eseguito solo su soggetti che non hanno patologie oculari retiniche centrali, del cristallino e della cornea. Viceversa è possibile analizzare qualunque immagine anche in presenza di qualsiasi difetto di vista. Pertanto, sia i soggetti che hanno una vista normale o meno, senza o con occhiali, o lenti a contatto possono essere sottoposti all'esame. Questo modello funziona utilizzando in combinazione tra loro tecniche fotografiche e di ricostruzione delle immagini analizzate con le aberrazioni ottiche dell'occhio da esaminare.⁽⁷⁵⁾ La realtà virtuale viene soprattutto utilizzata nella formazione e istruzione medica. Nella maggior parte di queste applicazioni, viene utilizzata per migliorare la fedeltà visiva degli oggetti simulati. Un modello grafico computerizzato 3D dell'occhio, anatomicamente dettagliato, in un ambiente virtuale è stato sviluppato per la chirurgia oculare. Il modello è stato progettato per simulare sia visivamente che meccanicamente le caratteristiche dell'occhio umano. Dunque, studiosi hanno utilizzato il simulatore della realtà visiva per rappresentare dettagli anatomici dell'occhio e per analizzare i suoi elementi.⁽⁷⁶⁾

Un altro progresso, ancora in fase di sviluppo, è una semplice rappresentazione olografica² del sistema oculare che è più realistica rispetto alla maggior parte dei modelli oculari attualmente utilizzati per l'istruzione optometrica. Questi ologrammi oculari producono un'immagine tridimensionale che un optometrista può esaminare più o meno allo stesso modo di un occhio umano. L'ologramma permette di andare oltre alle possibilità offerte da un disegno o fotografia e vedere un oggetto da diversi punti di osservazione. La proiezione di un'immagine tridimensionale e ben definita restituisce l'idea di realtà.⁽⁷⁸⁾ Di recente hanno usato

² L'olografia è una tecnologia ottica in grado di riprodurre in formato tridimensionale un'immagine registrata da un intreccio di frange di interferenza con impiego di luce laser coerente, opportunamente proiettata, così da poter essere vista da più punti di osservazione.⁽⁷⁷⁾

la tecnica olografica per misurare la rifrazione soggettiva e l'ampiezza dell'accomodazione di un occhio umano. Risultati recenti promuovono l'olografia come tecnica promettente per testare la visione umana, e come tecnica che si userà tanto in futuro. In uno studio, hanno usato questa tecnica per esaminare l'accomodazione dell'occhio. È stata sviluppata una tecnica di visualizzazione olografica a scansione orizzontale che ingrandisce sia le dimensioni dello schermo, sia l'angolo della zona di visualizzazione. Sono state misurate le risposte accomodative di una immagine tridimensionale generata da questa tecnica di visualizzazione olografica con un angolo della zona di visualizzazione orizzontale di $14,6^\circ$ e una dimensione dello schermo di 4,3 pollici. Si è scoperto che le risposte di accomodazione di un'immagine tridimensionale, visualizzata all'interno 400 mm dallo schermo, erano simili a quelli di un oggetto reale.⁽⁷⁹⁾

Ulteriori progressi saranno possibili attraverso due linee di sviluppo. La prima linea di sviluppo dovrà rivolgersi ad aumentare la plausibilità delle simulazioni oculari. La seconda linea di sviluppo, invece, cercherà di riprodurre occhi singoli e individuali.

CONCLUSIONE

Il processo visivo, è stato oggetto, nei secoli, di molti studi; ricercatori esperti hanno studiato i meccanismi della visione costruendo diversi modelli di occhi schematici per comprenderne le peculiarità. La notevole variabilità individuale nelle misure delle singole strutture oculari rende necessario utilizzare valori medi e un modello oculare semplificato per approssimare alcuni parametri. Fondamentale, per sviluppare un occhio schematico è innanzitutto, scegliere le caratteristiche che si vogliono studiare e i parametri ottici in modo opportuno secondo la stima più ragionevole basata sul confronto dello stato di rifrazione calcolato e osservato. Pur nella semplificazione e riduzione del numero o delle caratteristiche delle singole strutture oculari considerate non deve cambiare, nel complesso, il risultato simulato. Sfortunatamente, la modifica dei valori dei parametri, spesso, richiede un processo abbastanza complicato per le diverse equazioni sequenziali da svolgere. I modelli generici (medi) di occhi schematici sono della massima importanza per comprendere il sistema ottico, ma questi corrispondono ai disegni ideali di un modello oculare e non ai veri occhi individuali. In realtà l'occhio schematico serve a comprendere come funziona la refrazione ma non spiega la funzione in toto. Tuttavia, recenti progressi nella tecnologia hanno permesso di effettuare analisi di dati raccolti per la costruzione dell'occhio utilizzando moderni computer che permettono di svolgere calcoli risolvendo equazioni matematiche e fisiche molto complicate, in tempo reale.

L'analisi della letteratura scientifica porta a stabilire che per valutare accuratamente dimensione e qualità dell'immagine retinica dovuta alle aberrazioni, è necessario utilizzare modelli oculari più realistici rispetto ai modelli parassiali. Oggi, infatti, esistono dei moderni software, che permettono di misurare e fornire mappe e grafici sulla risposta oculare. Questi software permettono calcoli così sofisticati che gli occhi schematici "vecchi" non consentivano.

La tecnologia è diventata altamente avanzata e continua a evolversi. Ci sono molte ragioni per modellare l'occhio tra cui: optometria clinica; diagnostica oftalmica e chirurgia refrattiva; lenti intraoculari (IOL); occhiali e design delle lenti a contatto; strumentazione ottica; ricerca sulla visione ed educazione. Forse nel

tempo è cambiato l'approccio all'occhio schematico, ma i modelli oculari continuano a essere un riferimento della ricerca. Nuovi software sempre più evoluti permettono di modellare l'occhio e di immettere proprietà ottiche per un modello di occhio virtuale completo e personalizzato, in grado di simulare perfettamente il percorso visivo dell'occhio.

La visione inizia con la formazione delle immagini sulla retina e prosegue con una sequenza che coinvolge vari stadi delle vie nervose e gran parte del nostro cervello. La catena degli eventi che porta alla visione ha inizio dall'energia luminosa che proviene dagli oggetti esterni e che forma immagini rimpicciolite e rovesciate sul fondo dell'occhio. L'energia luminosa stimola i fotorecettori (coni e bastoncelli) che codificano i segnali luminosi producendo segnali bioelettrici. Questi segnali ne generano altri nelle cellule nervose che si succedono nella retina e nelle vie che vanno dall'occhio al cervello, dando luogo a una sequenza che si conclude nella corteccia cerebrale generando l'immagine visiva. Dunque, l'analisi dell'informazione visiva è molto più di un trasferimento e trasformazione di segnali elettrici. Il sistema visivo non registra semplicemente i segnali luminosi presenti nell'ambiente, ma li elabora dando vita a una percezione organizzata, attraverso meccanismi con forte componente cognitiva, che interpretano l'immagine e le associano un significato, infatti l'immagine visiva non è una rappresentazione fedele del mondo esterno, ma è il risultato di un processo di elaborazione cerebrale. Il nostro cervello raccoglie informazioni dal mondo esterno, scarta quelle superflue e ridondanti, e crea delle "simulazioni mentali", ovvero registra le forme, i colori, e i movimenti, ed elabora e classifica le informazioni ricevute, definendo così l'identità, la forma, il colore e la posizione nello spazio di un oggetto. Una delle abilità del nostro sistema percettivo è quella di creare un evento continuo sulla base di una sequenza di immagini statiche. I nostri occhi estraggono periodicamente campioni dell'informazione proiettata sulla retina; questi campioni di informazione vengono quindi integrati in modo da dar luogo alla percezione di movimento non brusco degli oggetti intorno a noi. Il processo della visione non è statico ma dinamico, e implica continui movimenti sia degli occhi sia della testa, che permettono l'esplorazione dello spazio circostante e l'osservazione dettagliata di ciò che attira la nostra attenzione.

La visione è capacità di visualizzare, identificare e memorizzare immagini dopo aver compreso e interpretato ciò che è stato visto. Si apprende e si sviluppa a partire dall'infanzia. Per imparare a camminare il bambino deve cominciare a gattonare, a strisciare lentamente, ad alzarsi per stare eretto, e infine a camminare senza aiuto. Un analogo processo avviene nello sviluppo della visione, infatti alla nascita si ha una visione grossolana e le abilità visive crescono passo dopo passo con la crescita corporea.

Dunque, la visione è un sistema complesso di raccolta ed elaborazione che collega, raggruppa, analizza, confronta e ricorda le informazioni acquisite, e definisce le potenzialità visive della persona che possono crescere nel tempo se rispettate e stimolate.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Antonio Delisa; i concetti della fisica: storia della luce;storiografia; 2013
- (2) Vision Device; Teorie della visione: cenni storici; blog; 2018
- (3) Gruppo Arcobaleno Lauree Scientifiche (GALS), Le diverse teorie della visione.
Tratto da: <http://crf.uniroma2.it/wp-content/uploads/2010/04/teorie-visione.pdf>
- (4) Dispense corso di ottica e oftalmica; Dominga Ortolan
- (5) https://www.scienzefn.unisalento.it/c/document_library
- (6) F.W. Sears; Ottica; Milano; Casa editrice Ambrosiana; 2013; 1; 1-3
- (7) Micaela Bonito; Storia della velocità della luce; Studenti.it ; Arnoldo Mondadori Editore S.p.A.; 2019
- (8) <http://www.anisn.it/matitaiptestivi/visione/date.htm>; Gli Antichi; Il Seicento; Scoperte 700-950
- (9) <https://it.wikipedia.org/wiki/Luce>
- (10) Gianluca Melatini; La Fisiologia della luce: le onde, l'occhio e la mente; Fisica moderna; Google scholar; 2015
- (11) Bucci M. G., "Oftalmologia", Roma, SEU, 1993; 1; 2
- (12) Rossetti A., Gheller P., "Manuale di optometria e contattologia", Bologna, Zanichelli, 2003, 2°; 3; 44-48, 70, 155-157
- (13) J. Walker; Halliday-Resnick-Walker; Serway-Jewett; Ottica geometrica; in: natura della luce;2018
- (14) Bucci M. G., "Oftalmologia", Roma, SEU, 1993; 6; 85-86.
- (15) Jane Veys, John Meyler, Ian Davies; Manuale pratico: elementi essenziali nella pratica delle lenti a contatto; The vision care institute; Johnson&Johnson Medical Ltd;Prima edizione; 2008; 4; 37-40
- (16) Willcox M.D.P., Argüeso P., Georgiev G., Holopainen J., Laurie G., Millar T. et al.; TFOS DEWS II tear film report; The Ocular Surface; 2017; 15; 366-403
- (17) Materiale del corso di contattologia I - prima parte della dispensa;1;15
- (18) Bucci M. G., "Oftalmologia", Roma, SEU, 1993; 9; 137.
- (19) Sergio Villani; Optometria e oftalmometrologia, Primo volume, University of Latvia school of optometry;1994;13; 220-229
- (20) Luigi Lupelli; Quando alla cornea non piace essere regolare; Contact lenses - Ciba Vision Academy; Editoriale

- (21) <https://it.wikipedia.org/wiki/Cristallino>
- (22) F.W. Sears; Ottica; Milano; Casa editrice Ambrosiana; 2013; 6; 134-136
- (23) Sergio Villani; Optometria e oftalmometrologia, Primo volume, University of Latvia school of optometry; 1994; 13; 233,240-241
- (24) Hugh Davson; Lens Development, Growth and Regeneration; The Eye; Volume IB: Vegetative Physiology and Biochemistry deals with the vegetative physiology and biochemistry of the eye; 3rd Edition; 2012; 3; 2
- (25) William J. Benjamin; Accommodation, the Pupil, and Presbyopia; Borish's clinical refraction; Second edition; Butterworth-Heinemann; 2006; 4; 116
- (26) Giuseppe Anastasi, Giuseppe Balboni, Raffaele De Caro; Trattato di Anatomia Umana, volume III, Milano, Edi.Ermes, 2007
- (27) Bucci M. G., "Oftalmologia", Roma, SEU, 1993; 16; 380.
- (28) Lloyd WA, Faragher RGA, Denyer SP; Ocular biomaterials and implants; Biomaterials; Editor-in-Chief: Professor Kam Leong, PhD; 2001; Volume 22; 8; 769-785
- (29) Dispense corso di anatomia- Professore Leonardi
- (30) Bucci M. G., "Oftalmologia", Roma, SEU, 1993; 14; 343,298-300.
- (31) Slatter, D. H., Maggs, D. J., Miller, P. E., & Ofri; Slatter's fundamentals of veterinary ophthalmology. St. Louis: Saunders; 2007
- (32) McGavin, D. M., Zachary, J. F., & Castagnaro, M; Patologia veterinaria sistematica; Milano: Elsevier; 4th Edition; 2010
- (33) Dyce, K. M., Sack, W. O., Wensing, C. J. G., & Cozzi, B; Anatomia veterinaria; prima parte di anatomia sistemica; Editore Antonio Delfino, Roma; 4th Edition; 2013
- (34) Anna Gentile, Maria Giovanna Scafati; Basic English for opticians; Editore Franco Lucisano; Milano, Prima Edizione 1999; 5; 14
- (35) Giampaolo Lucarini; Oftalmologia; argomenti di diottrica oculare; 2013; 3; 56-57
- Tratto da: <https://www.libreriauniverso.argomenti di diottrica oculare.it> › pdf
- (36) Giovanni Giusfredi; Manuale di ottica; Edizione italiana, Springer Verlag; 2015; 2; 24-26 /159-300
- (37) Rossetti A., Battistin R., Cappa S., Cavalli V., Comuzzi D., Gheller P., Madesani A., Migliori G., Parenti L., Peterle A., Pontus S., Possenti M., Reverdy G., Safilo, Sala F., Serretiello D., Tabacchi M., Zeri F., "Lenti e occhiali- Un Manuale di Ottica Oftalmica", Palermo, Medical Books, 2003; 3; 137.
- (38) Rossetti A., Battistin R., Cappa S., Cavalli V., Comuzzi D., Gheller P., Madesani A., Migliori G., Parenti L., Peterle A., Pontus S., Possenti M., Reverdy G., Safilo, Sala F.,

Serrettiello D., Tabacchi M., Zeri F., “Lenti e occhiali- Un Manuale di Ottica Oftalmica”, Palermo, Medical Books, 2003; 5; 503-508.

(39) Dispensa di ottica oftalmica e visuale; prof Dominga Ortolan p41, 50-53

(40) “OPTOMETRIA A-Z DIZIONARIO DI SCIENZE, TECNICA E CLINICA DELLA VISIONE”,L.Lupelli,2014 , Medical Books

(41) Dispense di Mauro Zuppardo; Ottica della visione; Università degli studi di roma; Punti e assi di riferimento dell’occhio; Ottica fisiologica; 2015;3

(42) Silvio Maffioletti, Andrea Maiocchi, Maria Elena Notari Nardari; La riflessione luminosa corneale nell’Ottica, nell’Arte e nell’Optometria

Tratto da: www.otticamaffiolettibergamo.it › files › files_publicazioni

(43) F .W. Sears; Ottica; Milano; Casa editrice Ambrosiana; 2013; 4; 89-93

(44) Sergio Villani; Ottica oftalmica: i difetti dell’occhio corretti con le lenti; Istituto politecnico centro studi in ottica e optometria “Vasco Ronchi”; Geo edizioni, la biblioteca scientifica; 2005; 1;22-25

(45) Ferdinando Catalano; Elementi di ottica generale; Bologna; Zanichelli Editore S.p.A; 2001; 5; 78-84

(46) Aristide Torrelli; Ottica; parte 2: Lenti spesse e obiettivi;2010

Tratto da: <https://www.aristidetorrelli.it/Articoli/Ottica>

(47) Ravi C.Bakaraju, Klaus Ehrmann, Eric Papas, Arthur Ho; Finite schematic eye models and their accuracy to in-vivo data; Vision Research; 2008; Volume 48, Issue 16; p 1681-1694

(48) David A. Atchison, George Smith; Optics of the Human Eye; 1st Edition; Butterworth-Heinemann;2000; 16;161,166-177

(49) David A Atchison; Larry N Thibos; Optical models of the human eye; Clinical and experimental optometry;2016

(50) George Smith; Invited Review Schematic eyes: history, description and applications; Clinical and experimental optometry; 1995; Volume 78; 5; 176–189

(51) Martin G.R; Schematic Eye Models in Vertebrates. In: Ottoson D., Autrum H., Perl E.R., Schmidt R.F., Shimazu H., Willis W.D. (eds) Progress in Sensory Physiology. Progress in Sensory Physiology, vol 4. Springer, Berlin, Heidelberg; 1983;2-3; 47-56

(52) Sergio Cappa; Elementi di ottica fisiologica: introduzione allo studio delle ametropie oculari; Edizione italiana; Lampi di Stampa;2010; 2; 13-17

(53) Berndt Ehinger, Andrzej Grzybowski; Allvar Gullstrand (1862–1930) – the Gentleman with the Lamp; Google scholar; 2011

(54) Popov I, Valašková J, Štefaničková J, Krásnik V; Prevalence of refractive errors in the Slovak population calculated using the Gullstrand schematic eye model; Pubmed: US National Library of Medicine National Institutes of Health; 2017

(55) Sergio Villani; Ottica oftalmica: i difetti dell'occhio corretti con le lenti; Istituto politecnico centro studi in ottica e optometria "Vasco Ronchi"; Geo edizioni, la biblioteca scientifica; 2005; 3; 94-98

(56) Corcoran A., Muyo G., van Hemert J., Gorman A., Harvey AR.; Application of a wide-field phantom eye for optical coherence tomography and reflectance imaging; J Mod Opt. 2015

(57) Bedggood PA, Ashman R, Smith G, Metha AB; Multiconjugate adaptive optics applied to an anatomically accurate human eye model; Optom Vis Sci; 2006

(58) Thibos LN¹, Ye M, Zhang X, Bradley A; Spherical aberration of the reduced schematic eye with elliptical refracting surface; Optom Vis Sci.1997

(59) Wang YZ, Thibos LN; Oblique (off-axis) astigmatism of the reduced schematic eye with elliptical refracting surface; Optom Vis Sci.; 1997

(60) Esteve-Taboada JJ, Montés-Micó R, Ferrer-Blasco T; Schematic eye models to mimic the behavior of the accommodating human eye; Pubmed: J Cataract Refract Surg. 2018; 44(5); 627-641

(61) Ramasubramanian, Viswanathan; Glasser, Adrian; Predicting Accommodative Response Using Paraxial Schematic Eye Models; Optom Vis Sci; 2016; 93(7): 692–704

(62) Li SM, Wang N, Zhou Y, Li SY, Kang MT, Liu LR, Li H, Sun YY, Meng B, Zhan SY, Atchison DA; Paraxial Schematic Eye Models for 7- and 14-Year-Old Chinese Children; Optom Vis Sci.; 2015; 56(6): 3577-83

(63) Viswanathan Ramasubramanian, Adrian Glasser; Predicting Accommodative Response Using Paraxial Schematic Eye Models; Optom Vis Sci. 2016 Jul; 93(7): 692–704.

(64) H. L. Liou, N. A. Brennan; The prediction of spherical aberration with schematic eyes; Science direct: Ophthalmic and Physiological Optics; Volume 16, Issue 4, July 1996, Pages 348-354

(65) <https://en.wikipedia.org/wiki/Zemax>

(66) https://it.wikipedia.org/wiki/Ray_tracing

(67) Zemax OpticStudio; Everything you need to design optical systems; Five steps to design your optical system in OpticStudio.

Tratto da: <https://www.zemax.com/products/opticstudio>

(68) Smith, George PhD; Bedggood, Phillip Boptom; Ashman, Ross PhD; Daaboul, Mary BSc (Hons); Metha, Andrew PhD; Exploring Ocular Aberrations with a Schematic Human Eye Model; *Optom Vis Sci.* 2008 May;85(5):330-40

(69) 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*; Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 2007

(70) Breault Research Organization; Advanced Human Eye Model (AHEM) - BIO Toolkit interactive script for ASAP; 2014

Tratto da: <http://www.breault.com/knowledge-base/advanced-human-eye-model-ahem-bio-toolkit-interactive-script-asap>

(71) William Donnelly; The Advanced Human Eye Model (AHEM): A Personal Binocular Eye Modeling System Inclusive of Refraction, Diffraction, and Scatter; *Pubmed: Journal of Refractive Surgery*; 2008; 24(9):976-83

(72) Jiaze Wu†, Changwen Zheng, Xiaohui Hu, Fanjiang Xu; Realistic Simulation of Peripheral Vision Using An Aspherical Eye Model; *EUROGRAPHICS 2011 / N. Avis, S. Lefebvre, Short Paper 2011*

(73) Juan F. Zapata-Díaz^a, Hema Radhakrishnan^a, W. Neil Charman^a, Norberto López-Gil; Accommodation and age-dependent eye model based on in vivo measurements; *Journal of Optometry*;2019; 12(1):3-13

(74) Manuel Uribe Troncoso M.D.; New Model of Schematic Eye for Skiascopy (Retinoscopy) and Ophthalmoscopy; *American Journal of Ophthalmology*; 1922; Volume 5, Issue 6, 436-441

(75) <https://occhio.it/simulatore-realta-visiva>

(76) Mark A. Sagar, David Bullivant, Gordon D. Mallinson, Peter J. Hunter; A virtual environment and model of the eye for surgical simulation; *ACM, Digital Library, New York, USA, 1994*

(77) <https://it.m.wikipedia.org/wiki/ologramma>

(78) Rosenblum W. M.; Gilman, B. G; Holographic representation of an ocular system; *Optometry and Vision Science: Journal of the American Academy of Optometry*; 1973

(79) Takaki Y¹, Yokouchi M; Accommodation measurements of horizontally scanning holographic display; *Pubmed: Opt Express*; 2012; 13;20(4):3918-31.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare, innanzitutto, la mia relatrice, la professoressa Ortolan, per la sua disponibilità, l'aiuto sempre attento e i suoi preziosi suggerimenti durante la stesura della tesi.

Ringrazio la mia famiglia per avermi dato l'opportunità di studiare, e grazie al loro costante sostegno e incoraggiamento mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Un ringraziamento particolare a mia sorella, Luana, senza di lei non sarebbe stato possibile per me arrivare al giorno della laurea.

Dedico questo importante traguardo a tutte quelle persone che mi sono state vicine e che hanno sempre creduto alle mie potenzialità.

Grazie!