

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea Triennale in Ottica e Optometria

Tesi di Laurea

Valutazione delle ametropie e della stereopsi con l'utilizzo di immagini olografiche

Relatore: Prof.ssa Cinzia Sada

Correlatore: Prof. Renzo Colombo

Laureanda: Sabrina Ventrudo

Matricola: 1056468

Anno accademico 2015/2016

Indice

	<i>Pagina</i>
Abstract	1
1. Introduzione	3
2. Obbiettivi	4
3. Refrazione	5
4. Dispositivi sperimentali	6
5. Fonte di luce e montaggio sperimentale	11
6. Materiale di registro olografico	13
6.1 Risultati	15
7. Oggetto per la misurazione della stereopsi	19
7.1 Risultati	29
8. Considerazioni differenze tra le due immagini registrate	30
9. Conclusioni	32
10. Tabelle dei risultati	35
11. Tentativi per la costruzione degli oggetti	41
Bibliografia	45

Abstract

Questa sperimentazione è stata svolta presso il laboratorio di olografia dell'università di Alicante. Consiste nella valutazione delle ametropie e della stereopsi con l'utilizzo di immagini olografiche;

Il lavoro si può dividere in quattro fasi:

- *Progettazione e costruzione di due oggetti*, uno per la valutazione delle ametropie e uno per la stereopsi. Entrambi gli oggetti sono stati fatti in laboratorio, il primo si compone di 21 numeri a distanze diverse dall'occhio. La base fisica di questo esperimento è quello di utilizzare la ricostruzione olografica di una figura tridimensionale per determinare la posizione del punto remoto dell'osservatore. L'occhio forma un'immagine reale dell'oggetto sulla retina, solo una parte di essa si trova nel piano della retina e un'altra parte si trova avanti o dietro. Nel montaggio abbiamo usato una lente di 10 diottrie, che formerà l'immagine dell'oggetto in punti remoti diversi degli osservatori; quindi in funzione dell'ametropia dell'osservatore l'immagine che apparirà sulla retina corrisponderà ad uno dei numeri e il resto appariranno sfocati. Nella posizione centrale dell'oggetto poniamo il numero "zero" la cui immagine si trova nella retina nel caso in cui il soggetto sia emmetrope.

L'altro oggetto invece è simile al test Frisby, è composto da tre piastre di vetro trasparenti di diverso spessore 6 mm, 3 mm e 1,5 mm, rispettivamente. Ad ogni piastra sono stati incollati delle figure in modo che parte della figura sia incollata sulla faccia anteriore e l'altra sulla faccia posteriore.

- *Realizzazione del materiale*: PVA 4-98 10% 50 ml + YE 1,2 ml + AA+TEA 8 ml + Acqua 1.2 ml + BMA 0,8 g;
- *Registrazione dell'ologramma*: Il laser utilizzato per supporti di registrazione è stato un Nd: YVO4 (Coherent Verdi V2) che emette ad una lunghezza d'onda di 532 nm, al quale è sensibile il materiale di registrazione.
- *Somministrazione degli ologrammi a 56 persone di età variabile dai 18 ai 62 anni*, 21 tra i 35 e i 62 anni e 36 tra i 37 e i 19, con un errore di rifrazione tra i -7D e +3D.

Inizialmente si è misurata l'ametropia al forottero in seguito la rifrazione è stata confrontata con il risultato del test olografico. Con l'ologramma per la valutazione delle ametropie i soggetti erano ad una distanza di 4,5 cm dalla placca. Gli osservatori visualizzavano l'ottotipo olografico illuminato con un fascio di riferimento con una lunghezza d'onda emessa da un laser He-Ne di 633 nm il cui fotopolimero è sensibile. L'ologramma una volta registrato veniva illuminato con un fascio omogeneo; veniva lasciato sbiancare al sole, al fine di rimuovere il colorante residuo alla placca di prova per garantire maggiore stabilità dell'immagine nel tempo.

Gli osservatori visualizzando l'immagine olografica riferivano tutti i numeri visti nitidi, ognuno di questi corrispondeva alla loro ametropia; si è visto che vi è una netta differenza tra gli osservatori tra i 19-36 e i 37-62. I risultati sono molto più corretti nel secondo gruppo, mentre i più giovani accomodando vedevano quasi tutti i numeri.

Con l'ologramma per la valutazione della stereopsi riferivano se riuscivano a vedere parte dell'immagine in rilievo e tutti gli osservatori sono riusciti a discriminarla.

1. INTRODUZIONE

L'olografia, di Holos greci (interi) e graphein (scrittura) è un sistema per la registrazione e la successiva visualizzazione di immagini e informazioni in tre dimensioni. Questa tecnica è stata inventata da Denis Gabor nel 1947. Le numerose applicazioni di questa tecnica nel campo della scienza, dell'ingegneria, progettazione grafica e arte hanno fatto in modo che oggi l'olografia appaia come uno dei campi più interessanti dell'avanzamento delle conoscenze attuali.

Per comprendere meglio il fenomeno olografico può essere utile confrontare la tecnica olografica con quella fotografica. Essere in grado di vedere un oggetto significa ricevere la luce emessa da questo una volta illuminato. La luce diffusa dall'oggetto è quello che chiamiamo onda oggetto e contiene tutte le informazioni relative alla loro forma esterna; Esso è costituito dalla sovrapposizione di tutte le onde emesse da ciascun punto dell'oggetto. Se possibile registrare questa luce e emetterla in seguito con un proiettore, l'immagine dell'oggetto non sarebbe distinguibile dall'oggetto stesso. Se si usa una macchina fotografica convenzionale per memorizzare le informazioni dell'onda oggetto o un CD verrà registrata solo la distribuzione di intensità della luce, mentre tutte le informazioni riguardanti la fase vengono perse.

Di conseguenza, l'onda luminosa emessa registrata quando si riproduce l'immagine di questo oggetto contiene meno informazioni dell'onda emessa dall'oggetto stesso. Il risultato è una immagine bidimensionale. I film fotosensibili e sensori ottici elettronici (CMOS, CCD, fotodiodi, fotomoltiplicatori) sono in grado di raccogliere solo radiazioni di luce visibile. Pertanto per memorizzare un'immagine tridimensionale è necessario registrare non solo l'ampiezza ma anche la fase di un'onda elettromagnetica. L'olografia, in particolare, utilizza la interferenza dell'onda dell'oggetto con un'altra onda chiamata di riferimento. Per ottenere un modello interferenziale, è necessario utilizzare una sorgente di luce coerente, come laser, un complesso olografico stabile e fornire un materiale di registrazione in grado di memorizzare il disegno interferenziale.

Al materiale di registrazione giunge tanta luce emessa dal fascio luminoso di riferimento direttamente dal laser come dal fascio di luce emesso dall'oggetto; entrambi percorrono lo stesso cammino ottico e interferendo tra di loro producono una sequenza ben precisa di frange di interferenza. Questo modello interferenziale che è memorizzato nel materiale ha sia informazioni di ampiezza che di fase dell'onda emessa dall'oggetto, in questo modo può essere costruita una immagine tridimensionale. Una volta registrato il modello interferenziale nel materiale si avrà un ologramma. Per riprodurre l'oggetto, è sufficiente ricostruire l'ologramma con un fascio di luce coerente il più possibile simile alla onda di riferimento utilizzato nel registro. Inoltre, il potere di risoluzione del materiale di registrazione dovrebbe essere elevato, in quanto le frange di interferenza sono generalmente separate di $1\mu\text{m}$. Questi ordini di grandezza richiedono una completa assenza di vibrazioni e movimenti degli elementi coinvolti nella formazione dell'ologramma. Per questo motivo, il laboratorio dell'Università di Alicante è dotato di un tavolo antivibrante in grado di assorbire le vibrazioni e le cui componenti individuali sono fissate al tavolo utilizzando accessori magnetici e viti.

2. OBIETTIVI

Questo lavoro ha lo scopo di progettare, produrre e valutare l'utilità di due nuovi dispositivi olografici: uno per misurare l'acuità visiva e uno per determinare la stereopsi. L'uso di ottotipi olografici permette di combinare le procedure soggettive convenzionali con la capacità di registro tridimensionale del metodo olografico. Pertanto, gli obiettivi di questo lavoro sono:

- Produzione di ologrammi per la valutazione di ametropie e della stereopsi
- Confronto tra i risultati ottenuti con i dispositivi olografici e i metodi oggettivi e soggettivi di uso comune in optometria su un campione statistico di 57 persone.
- Valutazione dei potenziali vantaggi e svantaggi.

3. Refrazione

3.1 Esame oggettivo

Nell'eseguire l'esame visivo l'optometrista verifica la condizione refrattiva valutando sia gli aspetti quantitativi che quelli qualitativi e facendo uso sia di tecniche oggettive che soggettive. La positiva peculiarità delle tecniche oggettive risiede nel fatto che esse non richiedono una partecipazione attiva da parte del soggetto esaminato, fornendo così un dato non dipendente dal suo atteggiamento e dalle sue risposte. Il dato oggettivo viene generalmente utilizzato come valore iniziale, da affinare successivamente attraverso la verifica refrattiva soggettiva;

Le tecniche di refrazione oggettiva di comune uso clinico sono:

- Cheratometria (o oftalmometria) e sue evoluzioni : permette di stabilire la curvatura della superficie anteriore della cornea ed eventuali irregolarità;
- Schiascopia o retinoscopia, che permette di valutare la refrazione totale.
- Refrattometria, che persegue i medesimi scopi della schiascopia, ma nella quale sono incluse le varie tecniche che valutano la refrazione totale con tecnologie differenti.



a



b



c

Figura 1a, 1b, 1c: Rispettivamente cheratometro, schiascopio, autorefrattometro.

Il primo dispositivo sperimentale da noi ideato ha lo scopo di valutare la refrazione totale dell'oggetto.

4. DISPOSITIVI SPERIMENTALI

La base fisica di questo esperimento è quello di utilizzare la ricostruzione olografica di una figura tridimensionale per determinare la posizione del punto remoto dell'osservatore. L'occhio forma un'immagine reale dell'oggetto sulla retina, solo una parte di essa si trova nel piano della retina e un'altra parte si trova avanti o dietro. Così il piano oggetto è formato sulla retina corrispondente all'immagine del punto remoto del soggetto, figura 2.

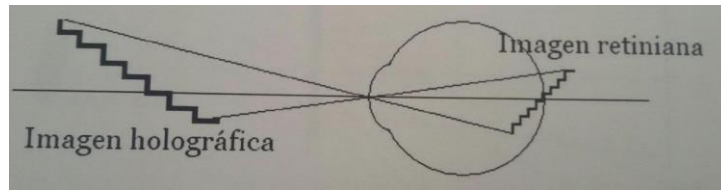


Figura 2: Posizione della immagine retinica.

Oggetto per misurare le ametropie

La progettazione e la costruzione di questo oggetto è stata fatta in laboratorio, si compone di 21 numeri a distanze diverse dall'occhio. Nella posizione centrale dell'oggetto poniamo il numero "zero" la cui immagine si trova nella retina nel caso in cui il soggetto sia emmetrope. Ogni numero ha un "raggiere" intorno ad esso per determinare l'astigmatismo. In fine non è stato misurato con questo per mancanza di tempo e di materiale.

La base è in alluminio, su cui sono state inserite 21 viti a testa piatta di 12 mm di diametro a cui sono stati incollati gli elementi dell'oggetto con nastro biadesivo, Figura 3,4.

Nel montaggio abbiamo usato una lente di 10 diottrie con cornice verde in figura 7a, che formerà l'immagine dell'oggetto in punti remoti diversi degli osservatori, quindi in funzione dell'ametropia dell'osservatore l'immagine che apparirà sulla retina corrisponderà ad uno dei numeri e il resto appariranno sfocati. I numeri e le ametropie considerate sono riportate nella tabella 1. I numeri da 0 a 20, sono stati stampati da una stampante laser su carta bianca in modo che il contrasto fosse alto e bordi nitidi.

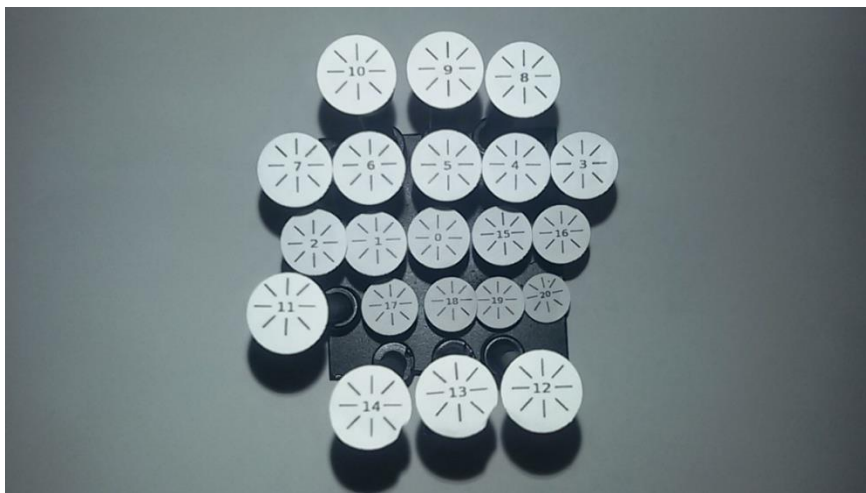


Figura 3: Vista frontale dell'oggetto



Figura 4: Vista laterale dell'oggetto

Tabella 1: Equivalenza tra le ametropie e i numeri assegnati nell'oggetto con semidispersione massima di 0,5 mm.

Optotipo	Ametropía (Diottrie)	Δs (cm)
14	-7	-4,1
13	-6,5	-3,9
12	-6	-3,7
11	-5,5	-3,5
10	-5	-3,3
9	-4,5	-3,1
8	-4	-2,8
7	-3,5	-2,5
6	-3	-2,3
5	-2,5	-2,0
4	-2	-1,6
3	-1,5	-1,3
2	-1	-0,9
1	-0,5	-0,4
0	0	0,0
15	0,5	0,5
16	1	1,1
17	1,5	1,7
18	2	2,5
19	2,5	3,3
20	3	4,2

Ogni numero ha una distanza dallo 0, è indicata nella tabella 2 come Δs ed è stata calcolata con questa formula;

$$-\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

$$-L + L' = P$$

Più precisamente per oggetti nel fuoco (numero 0):

$$s = \frac{1}{0 - 10} = -0,100 \text{ m}$$

$$\Delta s = 0$$

Per il numero 14 e 20 rispettivamente: $\Delta s = -4,12$ e $+4,29$ cm
come si può vedere nella tabella 2

L'aumento angolare per cui si vanno a vedere le immagini si può calcolare come si vede in figura 5.

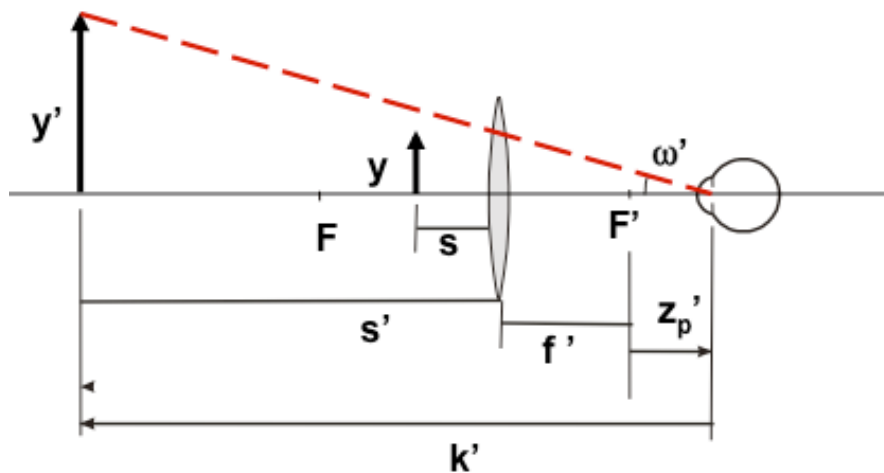


Figura 5: Schema dell'aumento angolare.

Aumento angolare:
$$M = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{Z'p}{k'} \right)$$

$$Z'p = 3 \text{ cm}$$

$$k' = -(-s' + f' + Z'p)$$

$$\text{punto prossimo teorico} = 250 \text{ mm}$$

$$s' = -6 \text{ m}$$

$$f' = 10 \text{ cm}$$

$$M = 2,5$$

Siccome i vari numeri sono disposti in posizioni differenti, con il calcolo dell'aumento angolare si vede se questo influisce sulla dimensione dell'immagine. L'aumento M ha una variazione tra 2,7 (-7 diottrie) e 2,1 (+3 diottrie), anche se c'è una variazione di 0,6 non va a modificare i risultati e andremo a ottenere, perché l'immagine non si modifica molto al variare della distanza dei vari oggetti. Se fosse cambiata di una unità o più sarebbe stato significativo e avremmo dovuto tenerlo in considerazione.

Abbiamo utilizzato la lente di 10 diottrie. Abbiamo valutato anche la possibilità di farlo con la lente di 5 o di 20 diottrie, però nel primo caso la differenza del Δs tra l'elemento più lontano dell'oggetto e quello vicino era troppo elevato, sarebbe risultato un oggetto di 40 cm di profondità come si può vedere in tabella 4.

Abbiamo usato il valore 0,1 della scala decimale perché era la dimensione minima apprezzabile. Il minimo discriminabile in un occhio normale viene misurata con un ottotipo con una linea di valore angolare di 1', e la totalità sarà di 5'. Tutti i numeri dell'oggetto sono di dimensione di 1,45 mm.

Dimensione immagine: $s' * tg(\theta) * 5$

Decimale	Grandezza in minuti
0,1	10'

Dimensione immagine: $s' * tg\left(\frac{10}{60}\right) * 5 * 1000 = 87,24 \text{ mm}$

Dimensione oggetto: $\frac{\text{Dimensione immagine}}{\text{Aumento immagine}} = -1,45 \text{ mm}$

La lente utilizzata è di 10 diottrie perché solo con questa riuscivamo a costruire un oggetto di una profondità che rispettasse la longitudine di interferenza.

5. FONTE DI LUCE E MONTAGGIO

Il laser utilizzato per supporti di registrazione è stato un Nd: YVO4 (Coherent Verdi V2) che emette ad una lunghezza d'onda di 532 nm, al quale è sensibile il materiale di registrazione. La registrazione di un ologramma consiste di due fasi: la registrazione e la ricostruzione.

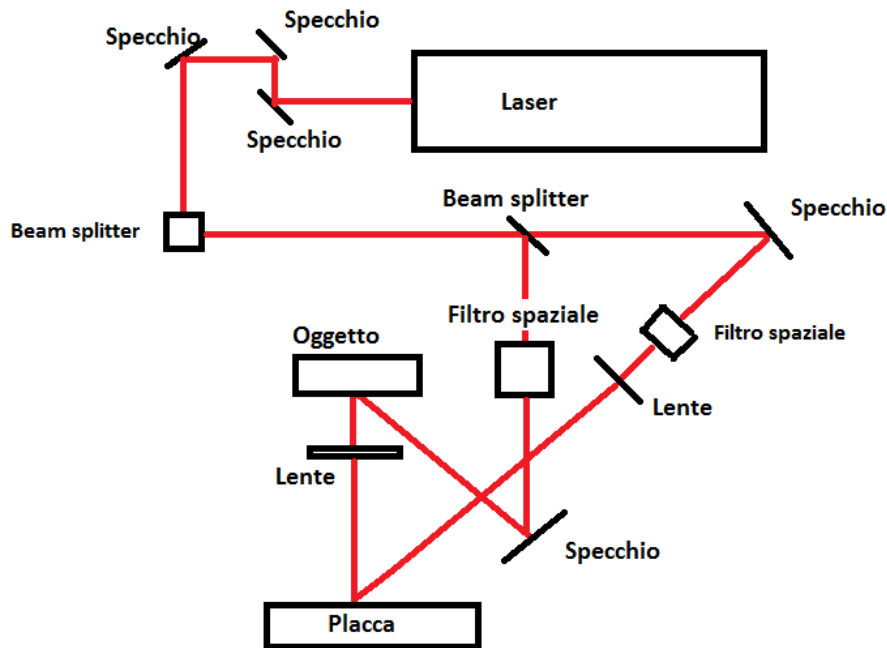


Figura 6: Schema a blocchi.

Registrazione:

La Figura 7a mostra una configurazione tipica di un ologramma di trasmissione. Prima il beam splitter divide il fascio di riferimento e di illuminazione. Quindi queste onde sono guidate da specchi e diversi filtri spaziali ("pinhole" e obiettivo microscopio) al materiale di registrazione e l'oggetto, rispettivamente. La luce diffusa dall'oggetto che raggiunge il materiale di registrazione rappresenta l'onda oggetto, e interferisce con l'onda di riferimento (che si dirige direttamente al materiale di registrazione) dando luogo ad una figura di interferenza che verrà memorizzata nel materiale di registro. A volte, per migliorare l'illuminazione dell'oggetto è meglio utilizzare una seconda onda di illuminazione simmetrica alla prima per impedire la formazione di ombre indesiderate su parti dell'oggetto. Noi abbiamo evitato le ombre con un singolo fascio.

Tutti i raggi devono essere paralleli al piano del tavolo in modo da facilitare l'interferenza tra gli assi.

Espandendo le onde di riferimento e oggetto viene utilizzato un filtro spaziale per pulire il fascio e evitare rumore nell'immagine.

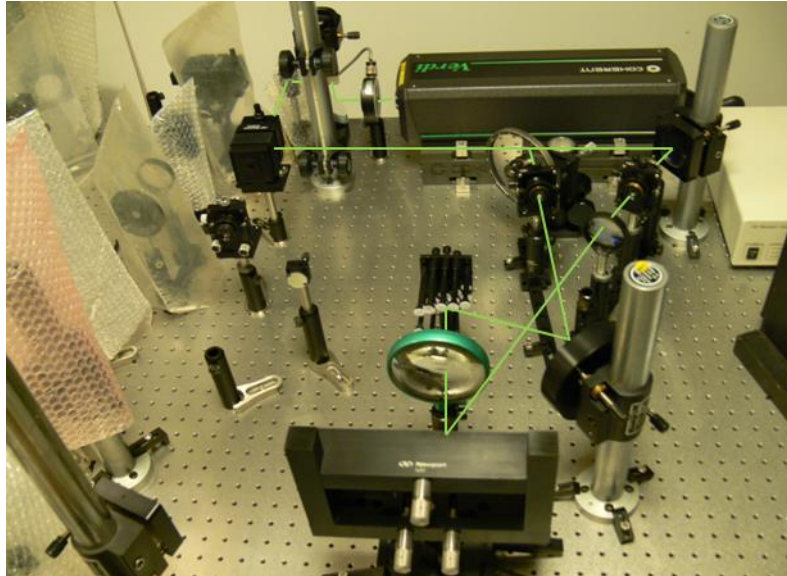


Figura 7a: Registrazione dell'ologramma

Ricostruzione:

Per ricostruire l'oggetto si illumina l'ologramma con una onda simile a quella di riferimento che provoca la diffrazione di questa onda per il pattern interferenziale registrato nell'ologramma si ottiene una onda simile a la onda oggetto dando luogo alla immagine olografica come mostrato in figura 7b.

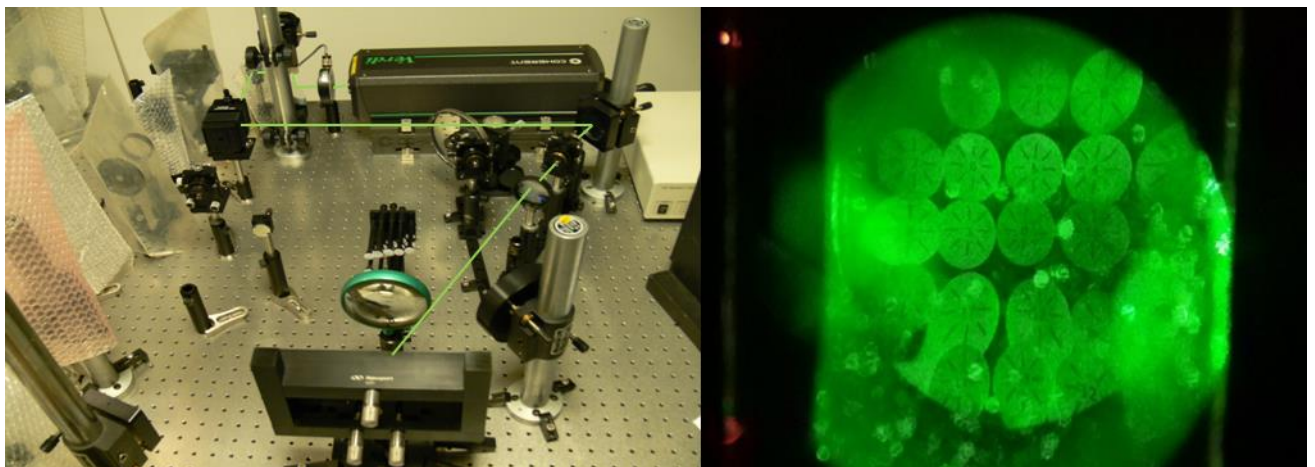


Figura 7b: Ricostruzione dell'ologramma e l'oggetto ricostruito

6. MATERIALE DI REGISTRO OLOGRAFICO

Fotopolimeri sono uno dei materiali di registrazione convenzionalmente usati nelle applicazioni olografiche. Nelle aree illuminate di questi materiali si formano catene di polimeri che aumentano l'indice di rifrazione di tali zone, ottenendo una immagine di fase. All'interno della vasta gamma di materiali di registrazione olografica, i fotopolimeri sono una delle migliori prospettive per il futuro. I fotopolimeri hanno prestazioni migliori (migliore sensibilità di energia e una maggiore modulazione dell'indice di rifrazione) quando si registrano gli elementi con frequenze superiori a 1000 linee/mm. Tuttavia questo è scomodo al momento di registrare con frequenze dell'ordine di 5000 linee/mm poiché questi materiali non hanno così tanta risoluzione.

Ho preparato il materiale olografico interamente in laboratorio. Sistemi fotopolimerizzabili sono composti da un film fotopolimerico che funge da vettore o "legante" (nel nostro caso PVA), un sistema fotoiniziatore costituito da un sensibilizzante (é stato utilizzato eosina giallastro, YE) e un donatore di elettroni (TEA) e uno o più monomeri, in questo caso acrilammide (AA) come monomero principale e N, N'-metilene bisacrilammide (BMA) e monomero reticolante (dà più stabilità), vedi Tabella 2.

Tabella 2: Composizione del materiale

PVA 4-98 10%	50 ml
YE	1.2 ml
AA+TEA	8 ml
Acqua	1.2 ml
BMA	0,8 g

AA + TEA soluzione:

6 g AA+ 5 ml TEA + 25 ml H₂O distillata

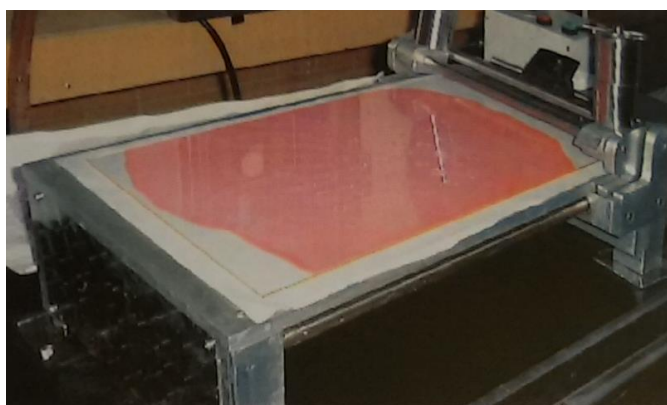


Figura 8 a : Materiale olografico lasciato a depositare per 24 ore.

Il processo di deposito è fondamentalmente stendere una soluzione fotopolimerizzabile su un vetro di dimensioni 24x40 cm² e spessore di 0.2 cm.

Poi lasciato asciugare per circa ventiquattro ore (Figura 2 a) ad un'umidità relativa tra il 40% e il 60% e una temperatura tra 24° C e 19° C. Dopo il tempo di essiccazione e si è formata una pellicola solida, il vetro è stato tagliato in piccoli quadrati di dimensioni 6,5x6,5 cm². In ciascuna delle quali viene registrata l'ologramma. Su ciascun pezzo è stato registrato in alcuni casi più di un ologramma. In questo lavoro abbiamo fatto oltre 100 ologrammi.

In seguito ci sono alcune foto rappresentative (Figura 8 a, 8 b, 8 c).

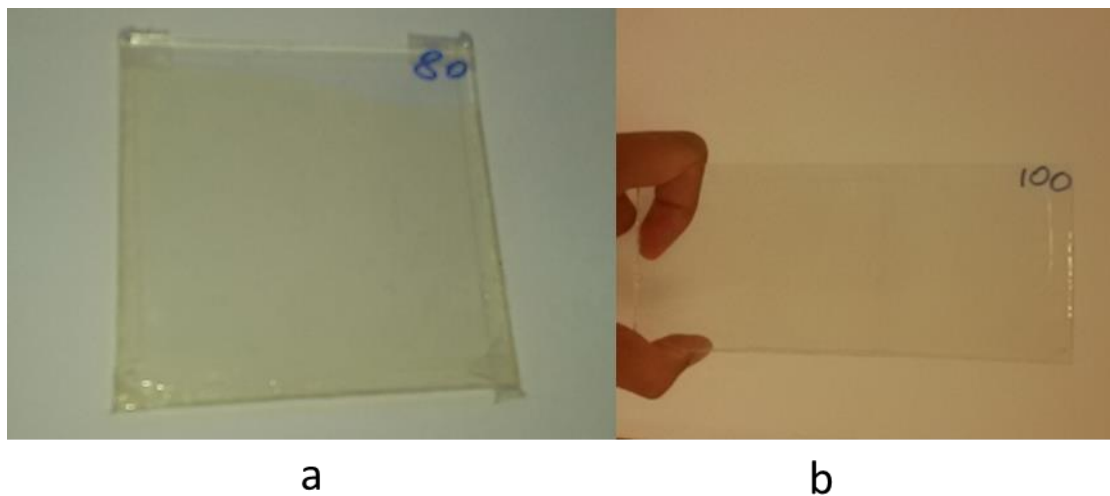


Figura 9 a, 9 b: La piastra posta al sole dell'immagine per determinare l'ametropia (a), Piastra posta al sole dell'immagine per misurare la stereopsi.

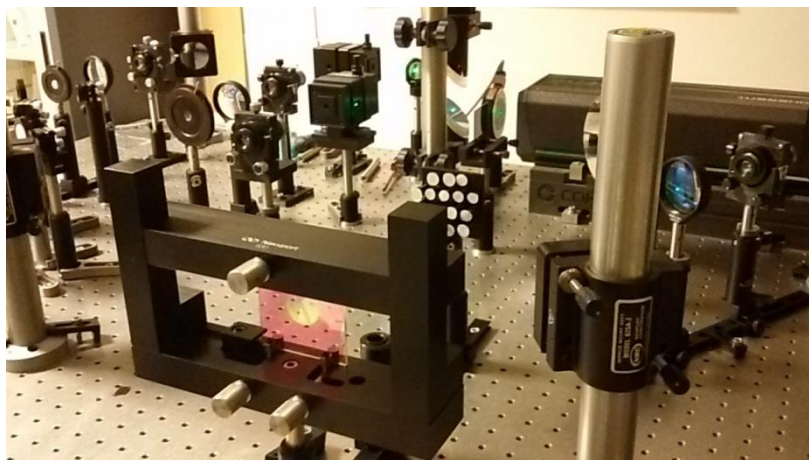


Figura 9 d: Montaggio con piastra appena registrata.

Il fascio laser viene diviso in due parti i due percorsi per rispettare la longitudine di interferenza devono percorrere un percorso il più possibile uguale. Se questo intervallo, che per il laser Nd:YVO₄ (Coherent Verdi V2) è abbastanza ampio, non viene rispettato non si forma il patrone interferenziale e non si crea l'immagine.

Abbiamo provato a calcolare il Δs di una lente di 5 diottrie e di 3,33 diottrie e 20 diottrie. Quella di 20 diottrie è stata utilizzata in lavori precedenti ma con il suo potere elevato per limitare le aberrazioni laterali ha un diametro piccolo. L'oggetto e di conseguenza i numeri sarebbero stati troppo piccoli perché siano visualizzati e costruiti, e soprattutto in laboratorio non disponevamo di una lente di questo potere.

Quella di 5 diottrie avrebbe portato ad un oggetto con una profondità di 40 cm, quella di 3,33 cm avrebbe portato alla costruzione di un oggetto di quasi 3 metri. Per questo motivo sono state scartate.

6.1 RISULTATI

In modo del tutto autonomo ho somministrato l'ottotipo a 57 osservatori di età compresa tra i 19 ei 62 anni, 21 tra i 35 e i 62 anni e 36 tra i 37 e i 19, con un errore di refrazione tra i -7D e +3D. Inizialmente si è misurata l'ametropia al forottero in seguito la rifrazione è stata confrontata con il risultato del test olografico. I soggetti erano ad una distanza di 4,5 cm dalla placca come mostrato in figura 10.

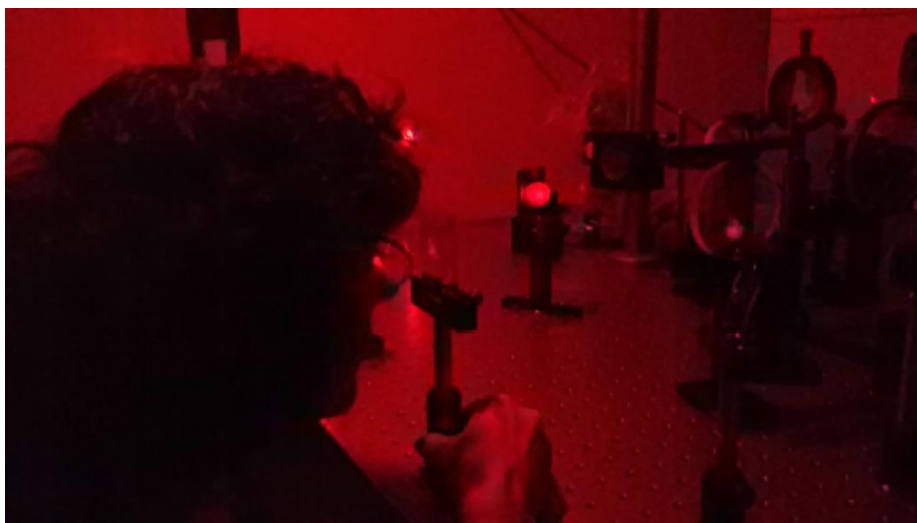


Figura 10: Montaggio con osservatore.

Gli osservatori visualizzavano l'ottotipo olografico illuminato con un fascio di riferimento simile a quello di riferimento ma con una lunghezza d'onda emessa da un laser He-Ne di 633 nm il cui fotopolimero è sensibile, vedere figura 11, con questo montaggio i soggetti poterono stare più vicino alla piastra. L'oggetto una volta registrato veniva illuminato con un fascio omogeneo; veniva lasciato sbiancare al sole, al fine di rimuovere il colorante residuo alla placca di prova per garantire maggiore stabilità dell'immagine nel tempo.

Quando gli osservatori visualizzavano l'immagine olografica mi riferivano tutti i numeri che vedevano nitidi e questi corrispondevano alla loro ametropia.

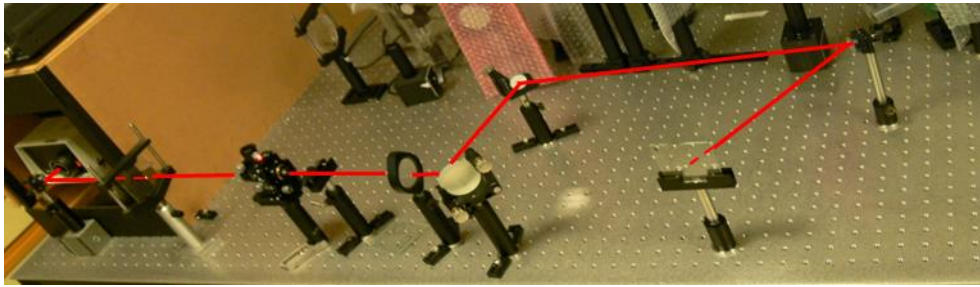


Figura 11: Montaggio di ricostruzione con longitudine d'onda di 633nm.

Abbiamo riscontrato una differenza tra i soggetti di una età compresa tra i 19 e i 36 e tra quelli con età compresa tra 37 e i 62. I soggetti più giovani accomodando vedevano quasi tutti i numeri con un errore molto maggiore rispetto ai presbiti. Ad esempio un miope di -4 diottrie invece di vedere solo i numeri dal 14 all'8 poteva arrivare anche al 5. Mentre molti presbiti mi hanno detto direttamente il numero corrispondente al potere sferico dell'occhiale effettivo per vicino.

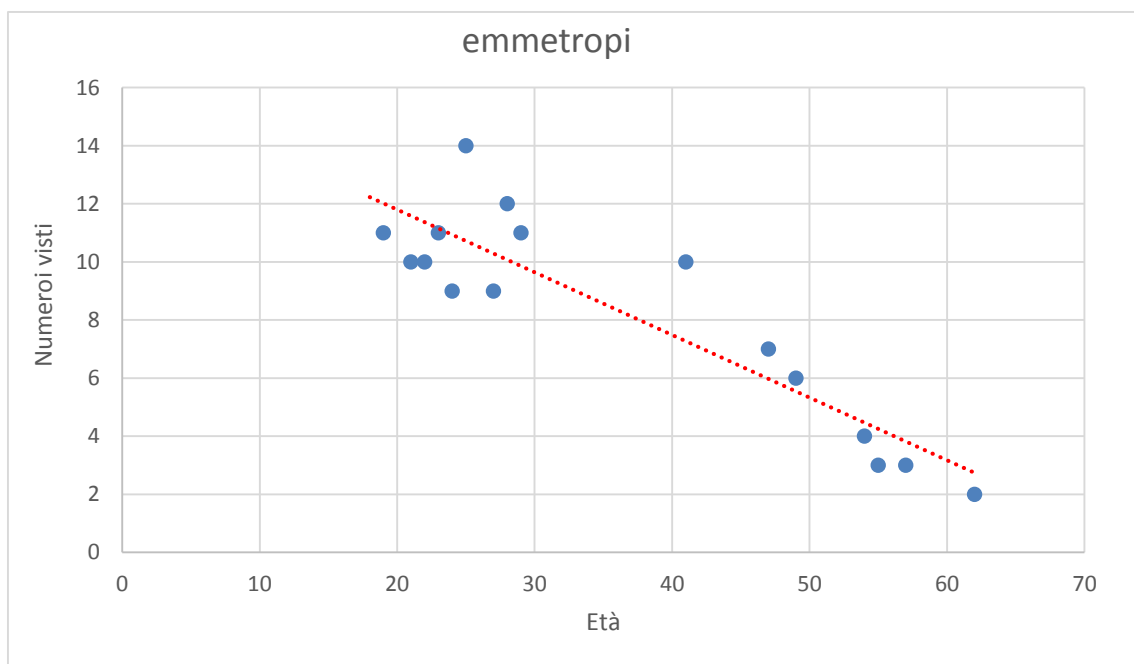


Figura 12: Grafico rappresentante la quantità dei numeri visti dei soggetti emmetropi

Come si può vedere nel grafico, figura 12, i valori dei giovani emmetropi hanno una dispersione dell'ordine di 2 unità. E vi è una progressiva diminuzione di numeri visti con l'aumento dell'età. Il tasso di decrescita della capacità di visualizzare numeri è tra il 20 e 25 %.

Mentre per i miopi, figura 13:

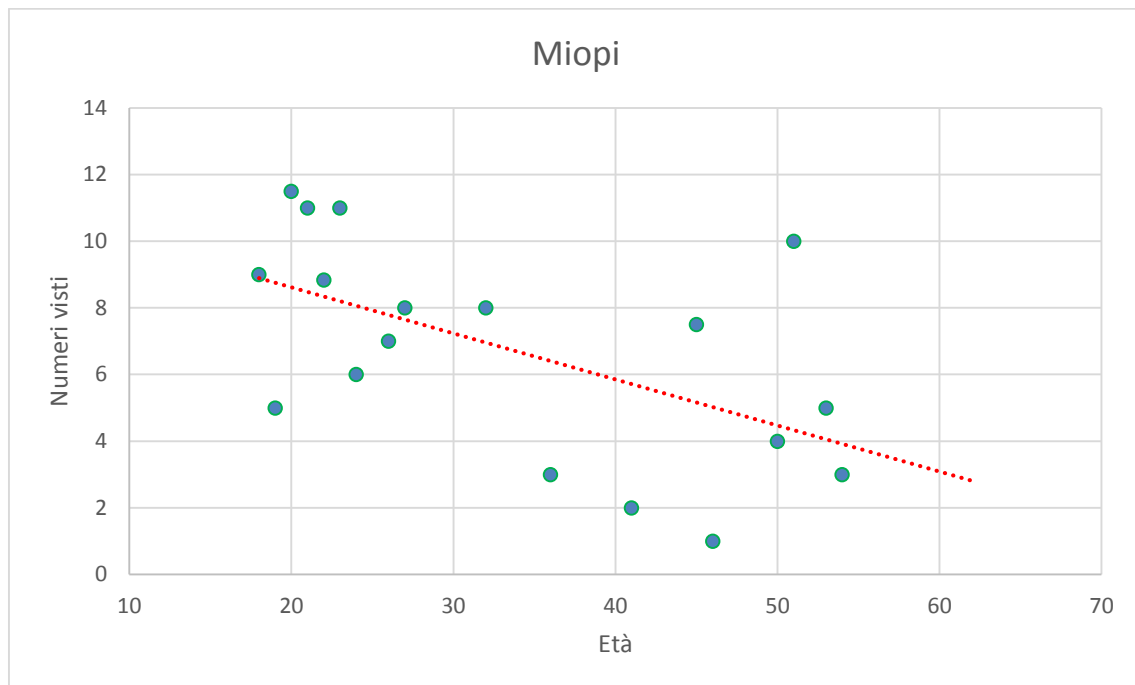


Figura 13: Grafico rappresentante la quantità dei numeri visti dei soggetti miopi

Nei soggetti miopi i dati sono più dispersi. Nei giovani la dispersione è dell'ordine di ± 4 unità, mentre nei più anziani è del ± 6 unità.

I numeri visti diminuiscono all'aumentare dell'età e quindi con la presbiopia.

Dunque con questo ologramma si può determinare la refrazione dell'occhiale da vicino per i presbiti con un errore maggiore nel caso siano miopi.

I soggetti ipermetropi erano di un numero troppo basso per poter fare una analisi significativa.

Su alcuni soggetti la somministrazione del test è stata ripetuta e la riproducibilità del test non ha mai mostrato risultati diversi sullo stesso soggetto superiori ad una unità.

Conseguentemente per i test somministrati agli emmetropi e i miopi al variare dell'età la variazione delle performance del soggetto sono statisticamente significative, dato che per i soggetti più anziani i numeri visti sono intorno alle 3 unità. Mentre per i soggetti più giovani siamo intorno alle 12.

7. OGGETTO PER MISURARE LA STEREOPSI

Visione binoculare

Worth nel 1915 ha proposto una suddivisione del processo evolutivo e cognitivo dell'apparato visivo umano; la **percezione binoculare** è composta da diversi fenomeni:

1. *percezione simultanea o diplopia*
2. *fusione*
3. *stereopsi*

Ogni fenomeno è di livello superiore al precedente, e la presenza del grado più elevato, la stereopsi prevede la presenza dei due precedenti.

1. *Percezione simultanea*

La **percezione simultanea** è rappresentata dalla capacità di entrambi gli occhi di apprezzare e trasmettere al cervello nello stesso istante la medesima immagine.

2. *Fusione*

La **fusione** è una capacità visiva successiva alla percezione simultanea, e presenta una componente motoria ed una sensoria. La prima implica l'attività dei muscoli estrinseci oculari, per il posizionamento degli assi visivi sull'oggetto interessato. La seconda è relativa alla capacità psichica di formare, da due immagini retiniche simili, una rappresentazione visiva singola.

3. *Stereopsi*

La **stereopsi** è la capacità percettiva che consente di unire le immagini provenienti dai due occhi, che a causa del loro diverso posizionamento strutturale, presentano uno spostamento laterale. Questa *disparità* viene sfruttata dal cervello per trarre informazioni sulla profondità e sulla posizione spaziale dell'oggetto mirato. Di conseguenza la stereopsi permette di generare la visione tridimensionale.

3.1 Meccanismo della stereopsi

La stereopsi è prodotta dall'integrazione, a livello del sistema nervoso centrale, delle leggere disparità retiniche dovute al fatto che i due occhi osservano il mondo da due punti di vista lievemente differenti. Tutti gli oggetti disposti su un cerchio immaginario che passa per i punti nodali dei due occhi e per il punto di fissazione formano immagini su punti corrispondenti delle due retine e hanno quindi zero disparità. Tutte le informazioni provenienti dai punti appartenenti a questo cerchio, detto *oroptero*, sono fuse e l'immagine percettiva risultante è unica. Punti distanti dall'*oroptero* generano immagini retiniche in punti non corrispondenti. La tolleranza delle distanze dall'*oroptero* per cui è possibile fondere le immagini dai due occhi per ottenere la

percezione unica di un solo oggetto è chiamata area di fusione di Panum. Gli oggetti posti più lontani dell'oroptero generano immagini con disparità omonima (cioè l'occhio destro dà luogo all'immagine vista a destra, e viceversa l'occhio sinistro), gli oggetti situati fra l'osservatore e l'oroptero generano disparità incrociata (immagine destra prodotta dall'occhio sinistro, e viceversa). L'acuità stereoscopica è data dalla minima differenza in profondità percepibile. Per l'uomo questa è dell'ordine di 10» di angolo visivo. Su questi principi fisici era basato lo stereoscopio, strumento inventato da Charles Wheatstone nell'Ottocento, che permetteva di proiettare immagini bidimensionali con diverse disparità ai due occhi e di generare così un'illusione di oggetto tridimensionale. Metodi moderni di visione tridimensionale, nella realtà virtuale, utilizzano visori diversi per i due occhi, mentre nelle sale cinematografiche per la visione di film 3D si utilizzano filtri colorati o lenti polarizzate per la proiezione di immagini diverse ai due occhi.

3.2 Elaborazione cerebrale dell'immagine stereoscopica.

In condizioni naturali, e in presenza di numerosi oggetti disposti a varie distanze, diventa molto complesso interpretare la disparità delle immagini dei due occhi e il cervello deve risolvere il problema della corrispondenza di queste immagini. Questo è un problema che il cervello affronta continuamente e che risolve quasi sempre con successo, anche in situazioni molto complesse come sono quelle fornite dagli stereogrammi per punti casuali, utilizzati per la prima volta da Bela Julesz (1964). In questa situazione sperimentale l'immagine monoculare non contiene nessuna informazione di forma e quindi nessun indizio su come associare le immagini nei due occhi per elaborare la disparità. L'informazione di tridimensionalità è contenuta nella disparità retinica del singolo quadratino, elemento base dell'immagine. Dopo alcuni istanti di osservazione di questi stereogrammi casuali si percepisce la forma 3D, con acuità e sensibilità stereoscopica simile a quelle ottenute per stimoli naturali. Il meccanismo alla base dell'analisi della s. sono le cellule binoculari corticali del lobo occipitale, cioè i neuroni che rispondono a input che colpiscono entrambi gli occhi. La maggior parte delle cellule binoculari risponde con una più alta frequenza di scarica quando i due occhi sono stimolati da immagini con zero disparità; molte altre però sono eccitate quando le due immagini corrispondono a disparità incrociate e inibite per disparità omonime; altre ancora eccitate per disparità omonime e inibite per disparità incrociate. La stima della possibile distanza dell'oggetto nasce quindi dal paragone delle attività di questi tre diversi tipi di neuroni, analogamente a come il colore di un oggetto è stimato dalle attività relative dei tre coni. Nel corso dell'evoluzione ontogenetica, la percezione

della terza dimensione sembra emergere quasi improvvisamente tra il terzo e il quarto mese di vita, per raggiungere i 60" di arco intorno ai 6 mesi. I valori tipici dell'adulto, di 40 secondi di arco, sono raggiunti solo dopo alcuni anni.

3.3 Anomalie della visione binoculare.

Anomalie della visione stereoscopica sono molto frequenti e sono dovute a una errata convergenza oculare, causata per es. da strabismo, o a una forte differenza delle immagini nei due occhi, susseguente per es. a una cattiva correzione di rifrazione. Funzionalmente gli input di un occhio possono dominare, esercitando una soppressione continua o alternante dei segnali provenienti dall'altro occhio, in ogni caso esercitando una benefica eliminazione della diplopia. Una visione binoculare anormale durante lo sviluppo porta alla perdita della visione stereoscopica (stereocecità) e spesso a forme di ambliopia, non recuperabile in età adulta.

A tal fine per quantificarne la stereopsi abbiamo progettato un oggetto per misurare la stereopsi in modo olografico simile al Frisby. Abbiamo dovuto progettare un oggetto, non reperibile in commercio, con le seguenti proprietà: adattabilità alloggiamento, per la registrazione l'oggetto deve avere una determinata grandezza, e trasparenza.

Progettazione oggetto

Il Frisby è composto da tre lastre di vetro trasparenti di diverso spessore 6 mm, 3 mm e 1,5 mm, rispettivamente, vedi Figura 14. Ogni lastra ha quattro quadrati in cui uno ha una figura sporgente o infossata, questo è dovuto al fatto che parte della figura è incollata sulla faccia anteriore e l'altra sulla faccia posteriore.

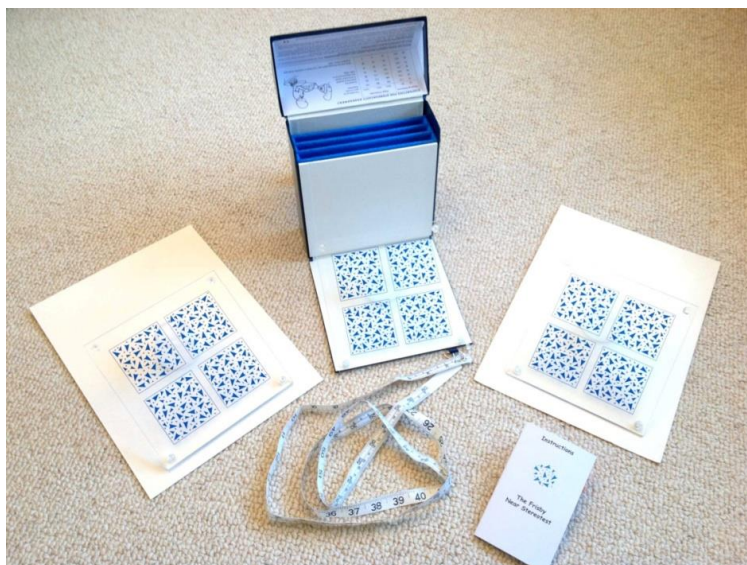


Figura 14: Test Frisby

In funzione della distanza dell'osservatore e dello spessore della lastra si apprezzeranno acuità stereoscopiche differenti come si può vedere nella tabella 3 in seguito.

Tabella 3: Stereopsi in funzione dello spessore delle lastre e della distanza dall'osservatore.

Distanza osservatore (cm)	Spessore lastra 6mm (secondi d'arco)	Spessore lastra 3mm (secondi d'arco)	Spessore lastra 1,5 mm (secondi d'arco)
30	600	300	150
40	340	170	85
50	215	110	55
60	150	75	40
70	110	55	30
80	85	40	20

Dopo diverse prove (vedere capitolo: Tentativi per la costruzione degli oggetti) siamo arrivati alla produzione di 3 oggetti: uno di 1,5 mm (figura 15a, 15b), di 3mm (figura 16a, 16b) e di 6mm (figura 17a, 17b).

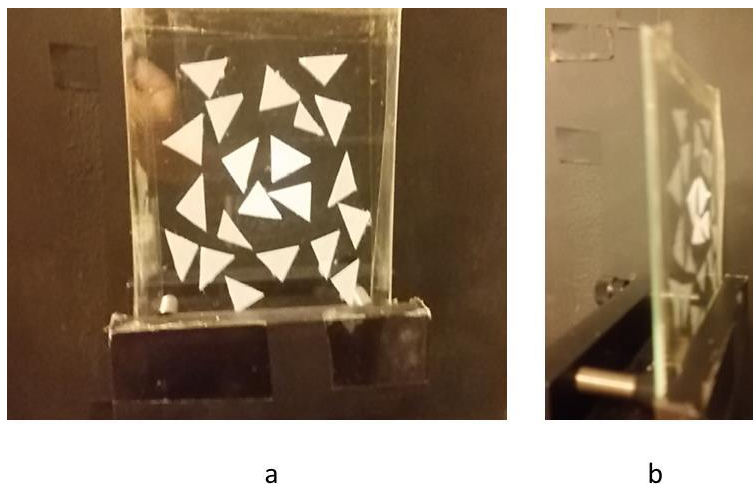
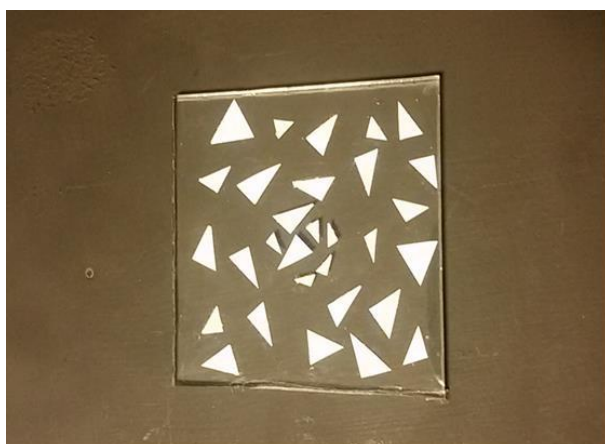


Figura 15a e 15b: Vista frontale (a) e laterale (b) dell'oggetto di 1,5 mm

L'immagine olografica corrispondente è riportata in figura 15c.



Figura 15c: Immagine olografica dell'oggetto di 1,5 mm



a



b

Figura 16 a, 16 b: Vista frontale (a) e laterale dell'oggetto di 3 mm.

La immagine olografica corrispondente è riportata in figura 16 c:



Figura 16c: Immagine olografica del terzo oggetto di 3mm.

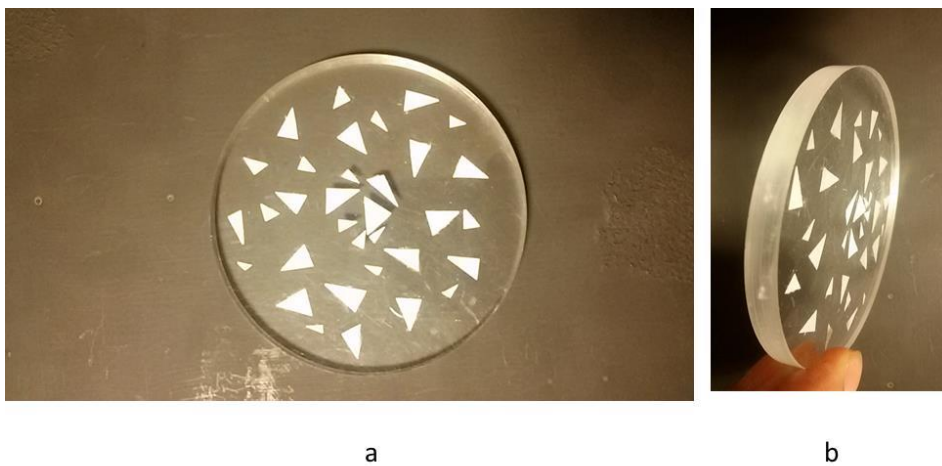


Figura 17 a, 17 b: Vista frontale (a) e vista laterale (b) dell'oggetto di 6 mm.



Figura 17 c: Immagine olografica corrispondente dell'oggetto di 6 mm.

Con l'ologramma per la misurazione dell'ametropia visto in precedenza è stata utilizzata una piastra di dimensioni 6,5 x 6,5 cm². Per la misurazione della stereopsi non era adeguata perché troppo piccola per permettere di utilizzare gli occhi contemporaneamente e, pertanto, non sarebbe stato possibile misurare la stereopsi. Abbiamo deciso di usare una piastra più lunga di 6,5 x 15 cm² con la quale si è potuto osservare l'immagine olografica con entrambi gli occhi contemporaneamente. (Figura 18a, 18b)



Figura 18 a: Piastra di fotopolimero dove si ha registrato l'ologramma corrisponde all'oggetto della stereopsi, si può distinguere la zona olografata, trasparente, dalla non olografata, rosa.



Figura 18 b: Piastra di fotopolimero registrata e esposta al sole, non si distingue la zona olografata. Questo da stabilità al materiale e permette migliore conservazione dell'immagine.

Tuttavia modificando la dimensione della piastra olografica è stato necessario aumentare il diametro del fascio di riferimento per registrare un'area più grande sulla piastra, anche la lente che forma l'immagine olografica è stata cambiata con una con un diametro più grande per far in modo che l'immagine venga vista da entrambi gli occhi contemporaneamente.

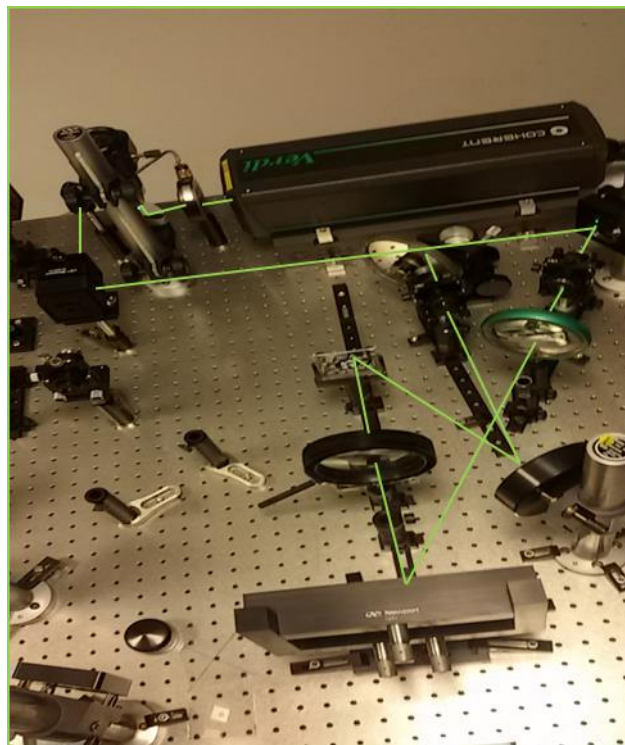


Figura 19: Montaggio

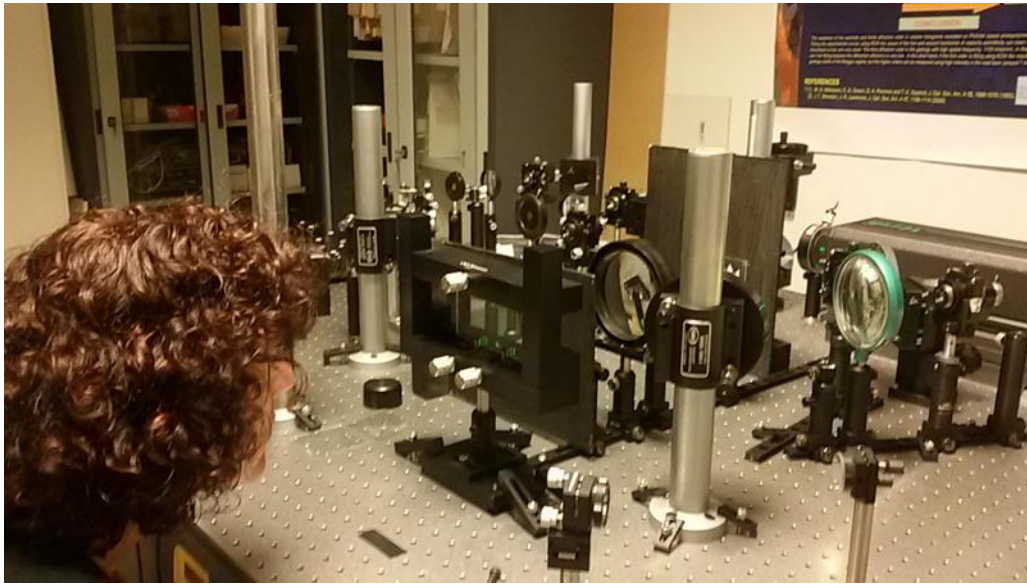


Figura 20: Posizione dell'osservatore nel test per la stereopsi

Questo comportò un cambiamento forzato delle lenti utilizzate per il montaggio, questa lente con diametro maggiore e focale più lunga ci ha costretti a ricalcolare la nuova posizione dell'oggetto (Figura 19,21).

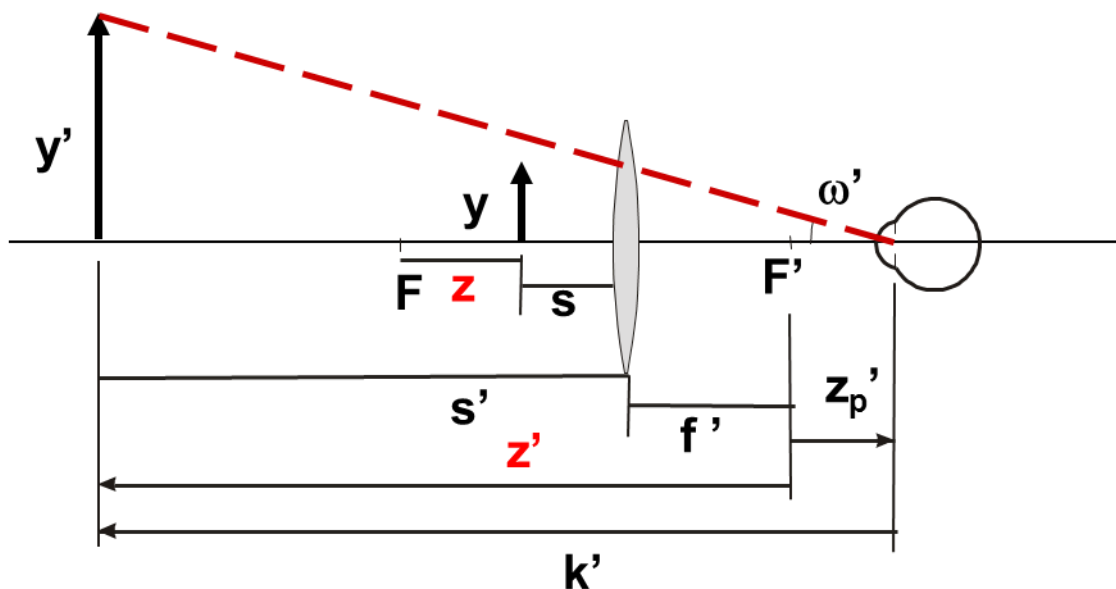


Figura 21: schema

Abbiamo utilizzato la formula di Newton:

$$zz' = -f'^2$$

La focale della lente è di 30cm, in questa posizione è stata posta la piastra dove si registra l'immagine olografica.

$$f' = 30 \text{ cm}$$

z' è la distanza alla quale vogliamo che cada l'immagine, siccome dobbiamo verificare che i soggetti raggiungano almeno i 40'' abbiamo deciso di considerare $z' = 80 \text{ cm}$ per l'oggetto di 6mm e 3mm e di $z' = 60 \text{ cm}$ per l'oggetto di 1,5 mm (Tabella 3).

Più precisamente abbiamo posto l'oggetto a 18,75 cm nel primo caso e a 15 cm nel secondo rispetto alla lente.

Per gli oggetti di 6 e 3 mm:

$$zz' = -30^2$$

$$z = \frac{-30^2}{-80} = 11,25 \text{ cm}$$

$$s = -30 + 11,25 = -18,75 \text{ cm}$$

Per l'oggetto di 1,5 mm:

$$zz' = -30^2$$

$$z = \frac{-30^2}{-60} = 15 \text{ cm}$$

$$s = -30 + 15 = 15 \text{ cm}$$

Come si può vedere anche in figura 21 noi non ci porremo mai con il nostro occhio direttamente nel punto focale, in cui è posta la piastra, ma ci sarà sempre una distanza (Z_p') alla quale ci posizioneremo per poter apprezzare l'immagine. In questo caso Z_p' sarà maggiore dell'oggetto per la misurazione dell'ametropia perché sto osservando con entrambi gli occhi. Per questo

motivo è come se il soggetto guardasse una immagine più distante di quella voluta di circa 15-20 cm. Questo non è stato un problema per gli oggetti di 6 e 3 mm mentre quello di 1,5 mm anche se il grado di difficoltà stereoscopico sarebbe dovuto essere uguale a quello di 3 mm, essendo molto sottile, era molto più difficile apprezzare che parte dell'immagine era in rilievo. Quindi mentre tutti e 50 i soggetti sono riusciti ad apprezzare un cerchio che soprassaliva nella immagine dell'oggetto di 3 mm, in quella di 1,5 mm 15 persone non riuscivano a vederne la tridimensionalità. Infatti considerando i valori della tabella 3 e vedendo la progressione della stereopsi in relazione alla distanza con un conto approssimativo si può vedere che per l'immagine dell'oggetto di 6mm si può apprezzare una stereopsi approssimativa di 75", per quella di 3 mm una stereopsi di 38"/40" e per quella di 1,5 mm di 20".

7.1 Risultati

A tutti i soggetti è stato sottoposto anche questo tipo di test. Tutte persone osservate con la propria correzione, a parte 2 soggetti che avevano una patologia in uno dei due occhi, sono stati in grado di raggiungere i 38". Solo 15 persone non sono riuscite discriminare i 20".

8. CONSIDERAZIONI SULLA DIFFERENZA TRA LE 2 IMMAGINI REGISTRATE

Le due immagini, come spiegato nei capitoli precedenti, sono state registrate con due lenti differenti. Una lente di 10 D e 8,5 cm di diametro per l'immagine per l'oggetto per determinare l'ametropia, 3,33 D e 9,5 cm di diametro per l'immagine per misurare la stereopsi.

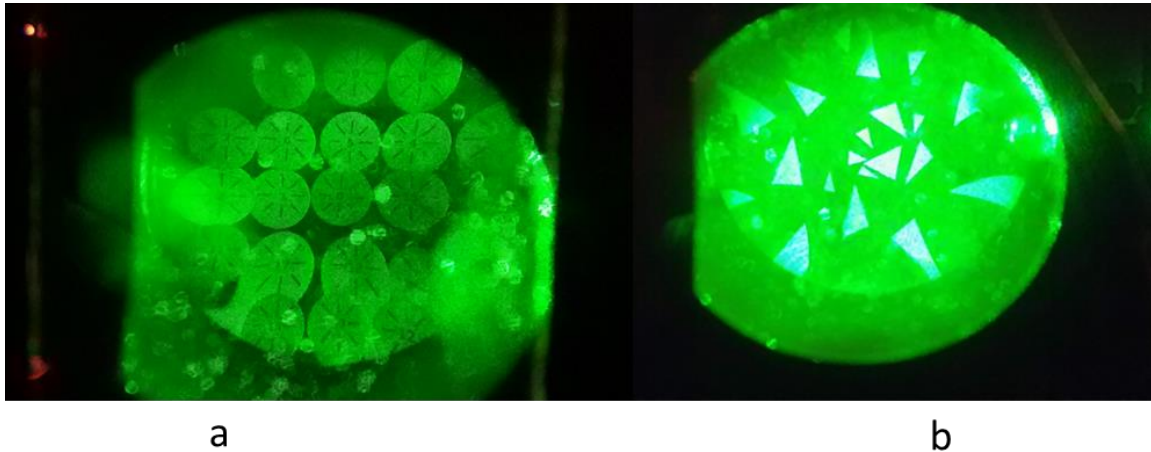


Figura 22a, 22b: La immagine di sinistra (a) è stata registrata con una lente di 10 D, la immagine di destra (b) con la lente di 3,33 D

Come si può vedere in figura l'immagine sulla sinistra mostra più aberrazioni rispetto quella di destra. Questo perché nei bordi la lente induce a molte aberrazioni ed essendo di un diametro più piccolo di quello della lente di destra deforma molto di più l'immagine. Non tutti i cerchi (Figura 22 a) hanno la stessa dimensione questo è dovuto all'aumento angolare:

$$\text{Aumento angolare:} \quad M = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{Z'p}{k'} \right)$$

$$Z'p = 3 \text{ cm}$$

$$k' = -(-s' + f' + Z'p)$$

$$\text{punto prossimo teorico} = 250 \text{ mm}$$

$$s' = -6 \text{ m}$$

$$f' = 10 \text{ cm}$$

$$M = 2,5$$

Tabella 4: Aumento angolare rispettivo ad ogni ametropia
(Oggetto per misurare le ametropie).

Potere soggetto	Aumento angolare M
-7	2,77
-6,50	2,76
-6	2,75
-5,50	2,74
-5,00	2,73
-4,50	2,71
-4,00	2,70
-3,50	2,68
-3,00	2,66
-2,50	2,64
-2,00	2,62
-1,50	2,59
-1,00	2,57
-0,50	2,54
0,00	2,51
+0,50	2,46
+1,00	2,41
+1,50	2,36
+2,00	2,30
+2,50	2,22
+3,00	2,13

Come già spiegato in precedenza, c'è una variazione di 0,64 che non va a modificare i risultati, perché l'immagine non si modifica molto al variare della distanza dei vari oggetti. Se fosse cambiata di una unità o più sarebbe stato significativo e avremmo dovuto tenerlo in considerazione.

Nell'altra immagine (Figura 22 b) l'aumento angolare

$$\text{Aumento angolare: } M = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{Z'p}{k'} \right)$$

$$Z'p = 10 \text{ cm}$$

$$k' = -(-s' + f' + Z'p)$$

$$M = \frac{250}{f'} \left(1 + \frac{10}{(-80+10)} \right) = 0,7$$

In questo la parte centrale dell'immagine è più vicina di al massimo 6 mm un valore trascurabile nell'aumento angolare. Infatti come si può vedere in figura 22 b tutto appare omogeneo.

9. CONCLUSIONI

Oggetto per misurare le ametropia

Inizialmente ci si aspettava, soprattutto leggendo i lavori svolti in precedenza, che si sarebbe misurata la rifrazione ottenuta per lontano con qualche effetto sulla accomodazione sui giovani per la distanza di osservazione. Così è stato per i giovani mentre molti presbiti riferivano il numero corrispondente al potere sferico dell'occhiale per vicino.

Dunque con questo ologramma si può determinare la refrazione dell'occhiale da vicino per i presbiti con un errore maggiore nel caso siano miopi.

Guardando i risultati si può vedere che c'è una netta differenza tra gli osservatori tra i 19-36 e i 17-62. I risultati sono molto più corretti nel secondo gruppo di persone, mentre i più giovani accomodando nella maggior parte dei casi vedevano quasi tutti i numeri. Soprattutto si è visto che non veniva misurato la graduazione per lontano ma per vicino.

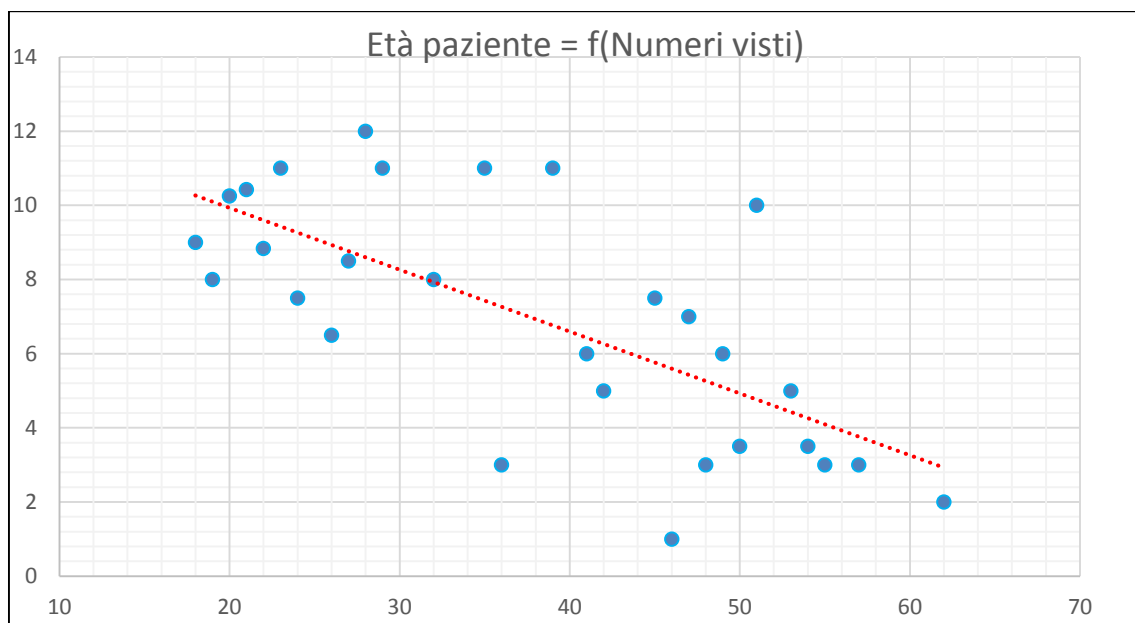


Figura 23: Grafico dei dati con linea di tendenza

In questo grafico, Figura 23, si può vedere come con l'aumentare dell'età e quindi con la presbiopia il numero di numeri visti e di conseguenza l'errore cala fortemente. La variazione massima rispetto alla linea di tendenza non va oltre alle 5 unità.

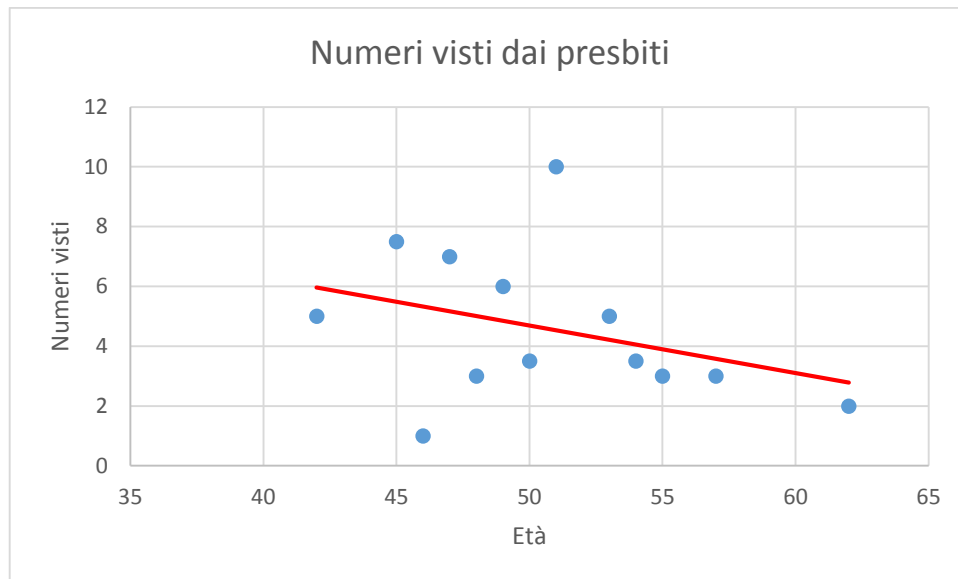


Figura 24: Grafico dei soggetti presbiteri

Dai dati sperimentali, figura 24, tendenzialmente i soggetti perdono la capacità di visualizzare tre numeri successivamente ad un invecchiamento di 20 anni.

Oggetto per la misurazione della stereopsi

Questo oggetto è stato interessante dal punto di vista olografico perché immagine che risultava era molto definita e nitida. Ma dal punto di vista optometrico non trovo nessuna applicazione in quanto il test Frisby è molto più comodo e realistico in quanto sto guardando un oggetto reale e non una immagine, per quanto quella olografica sia in 3D.

Miglioramenti possibili

Per migliorare questi due esperimenti si potrebbe utilizzare la tecnica del multiplexing;

Per togliere le aberrazioni dell'immagine 17 a si potrebbero fare più oggetti ponendo solo centralmente 5 numeri. Per ovviare al fatto che in questo modo avrei 4 piastre da sottoporre al soggetto, potrei utilizzare la tecnica del multiplexing; Registrare le diverse immagini degli oggetti nella stessa piastra con una angolatura differente tra i 2 e 3 gradi di differenza.

Il multiplexing è una tecnica per registrare più immagini olografiche nella stessa piastra, cambiando l'angolazione della piastra al momento di registrare un'altra immagine. L'importante in questa tecnica è di utilizzare un materiale che permetta di registrare molte immagini, che abbia una buona sensibilità energetica. (Figura 25)

Il limite di questa tecnica è che più immagini vengono registrate meno luminose saranno le immagini (minore rendimento nella diffrazione), si perderà il contrasto e di conseguenza le immagini potrebbero essere meno nitide. In quanto ogni ologramma consuma un po' del

colorante totale, più ologrammi si vogliono registrare meno rendimento avrà ognuno fino all'ultimo ologramma che non si potrà registrare perché non rimarrà più colorante nella placca. Nel laboratorio dell'università di Alicante con lo stesso materiale che ho utilizzato hanno registrato fino a 90 ologrammi con un rendimento di 2%, con un solo ologramma si ha un rendimento del 90%.

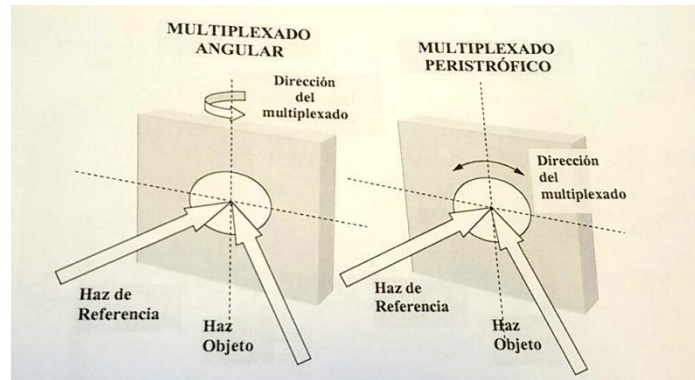


Figura 25: Multiplexing.

Nello stesso modo si potrebbe fare per la immagine per la stereopsi, invece di aver 3 piastre come descritto in precedenza sarebbe stato più comodo averne avuta una sola e semplicemente muovendola vedere più immagini.

10. RISULTATI

Risultati dei soggetti con una età compresa tra i 35 e i 62 anni;

In **ROSSO** sono stati riportati i numero corrispondente **corretto** mentre in **AZZURRO** gli **errori**

	Femm/Maschio Con anni 35-62	Abituale	Soggettivo	Numero visualizzato
1	F, 50 anni Dice direttamente che vede il 19 molto piú nitido degli altri	Occhile per lontano: OD -2,75 -1,00 95 OS -2,75 -1,00 100 Occhiale per vicino: OD +2,50 -1,00 95 OS +2,50 -1,00 100	OD -2,75 -1,00 95 OS -2,75 -1,00 100 OD +2,50 -1,00 95 OS +2,50 -1,00 100	OD: 19 OS: 19
2	M, 46 anni Vede solo il 14	OD: -7,00 0,25 160 OS: -7,00 0,25 160	OD: -7,0 0,25 160 OS: -7,00 0,25 160	OD: 14 OS: 14
3	M, 48 anni Vede molto bene il 20	Occhiale progressivo OD: +1,50 -0,50 70 OS: +1,25 -0,50 60 Addizione: +2,00	OD +1,50 -0,50 70 OS +1,25 -0,50 60	OD: 20 , 19, 18 OS: 20 , 19, 18
4	M, 35 anni	OD 0,00 -0,25 1 OS +2,25 -1,25 180	OD -0,25 -0,25 1 OS +2,25 -1,25 180	OD 15,13,12,11,7,6,5,4,3, 0 OS 20 ,19,18,17,16,15,12,7,5,4,0
5	M, 62 anni	Occhiale da vicino OD +3,75 -0,75 63 OS patología	OD +3,75 -0,75 60 OS /	OD 20 ,19 OS /
6	M, 53 anni	OD -3,25 -0,50 171 OS -3,75 -0,25 170 Occhiale da vicino OD +2,00 OS +2,00	OD -3,00 -0,75 160 OS -3,75 -0,75 145 Occhiale da vicino OD +2,50 OS +2,50	OD 19 , 18, 17, 16, 2, 1, 0 OS 19 , 18, 17, 11, 2, 1
7	M, 41 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 15, 11, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0 OS 17,1 5, 12, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0

8	M, 45 anni	OD -0,75 OS -0,50 0,25 180	OD -0,25 OS -0,75 0,50 155	OD 19,17,15, 2, 1, 0 OS 17,15,7,6,5,4,2,10
9	F, 45 anni	OD -0,50 -0,75 10 OS -0,50 -0,75 165	OD -1,00 -0,50 15 OS -0,75 -0,50 155	OD 15, 11,7, 6, 5, 4, 2, 1, 0 OS 15, 9, 7, 6, 5, 4, 2, 1, 0
10	F, 42 anni	OD / OI /	OD 0,00 OS -0,75	OD 6,5,4,1,0 OI 7, 2,1,0
11	F, 36 anni	OD -3,50 OS -2,50	OD -3,75 OS -2,50	OD 9, 7, 5 OS 9, 5
12	F, 39 anni	OD +0,75 -0,25 12 OS +0,75 -0,50 155	OD +0,75 -0,25 15 OS +0,50 -0,50 170 Addizione: +0,50	OD 16,15, 10,9,8,7,6,5,4,1,0 OS 16,15,10,9,8,7,6,5,4,3,2,1,0
13	M, 41 anni	OD -6,50 OS -6,50	OD -7,00 -0,50 180 OS -7,00 -0,50 180	OD 14, 11 OS 14,
14	F, 57 anni	OD / OS / Occhiale da vicino: OD +2,00 -0,25 115 OS +2,00 -0,25 150	Lontano OD -0,50 -0,50 90 OS +1,00 -0,50 180 Vicino OD +2,00 -0,25 115 OS +2,00 -0,25 150	OD 19, 18, 17, 15, 2, 1, 0 OS 19, 18, 17
15	M, 50 anni	OD / OS /	Lontano OD -0,25 OS -1,00 Vicino OD + 2,00 OS + 1,50	OD 19, 18, 17, 2, 1, 0 OS 19,18, 17, 16, 15, 7, 6, 2, 1, 0

16	F, 49 anni	Lontano OD / OS / Occhiali da vicino OD +1,50 OS +1,50	Lontano OD +0,25 OS +0,50 Occhiali da vicino OD +1,50 OS +1,50	OD 19, 18 , 17, 16, 15, 2, 1, 0 OS 19, 18 , 17, 15, 1, 0
17	F, 55 anni	Lontano OD / OS / Occhiali da vicino OD +2,00 OS +2,00	Lontano OD +0,25 -0,50 45 OS 0,00 Occhiali da vicino OD +2,00 OS +2,00	OD 19 , 18, 17 OS 19 , 18, 17, 15, 2
18	F, 51 anni	Lontano OD -2,50 OS -1,50 Occhiali da vicino OD +2,50 OS +2,00	Lontano OD -2,50 OS -1,50 Occhiali da vicino OD +2,50 OS +2,00	OD 19 , 16, 15, 13,10,7,5,4,2,1,0 OS 19, 18 , 17, 16, 7, 6, 5,4,2,1,0
19	M, 54 anni	Lontano OD -0,50 OS -0,50 Occhiali da vicino OD +1,50 OS +1,50	Lontano OD -0,50 OS -0,50 Occhiali da vicino OD +1,50 OS +1,50	OD 18,17 ,2,1,0 OS 18, 17 , 1, 0
20	M, 54 anni	Lontano OD / OS / Occhiali da vicino OD +2,50 OS +2,50	Lontano OD / OS / Occhiali da vicino OD +2,50 OS +2,50	OD 19,18,17 OS 19,18,17
21	F, 47 anni	Lontano OD / OS / Occhiali da vicino OD +1,50 OS +1,50	Lontano OD / OS / Occhiali da vicino OD +1,50 OS +1,50	OD 17 , 15, 7, 5, 2, 1, 0 OS 17 , 15, 7, 6, 5, 2, 1, 0

Soggetti con età compresa tra i 19 e i 32;

	Maschi/Femm Con età 19-32	Abituale	Soggettivo	Numero visualizzato
1	M, 18 anni	OD -3,75 -1,00 91 OS -3,50 -0,50 88	OD -3,75 -1,00 90 OS -3,25 -0,50 90	OD: 14, 13, 12, 11, 10, 9, 7, 6, 5 OS: 14, 13, 12, 11, 10,9,8,7,6,5,4
2	M, 22 anni	OD -2,50 -1,50 100 OS -2,75 -0,75 50	OD -2,75 -1,25 100 OS -3,00 -0,50 55	OD: 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 OS: 14, 13, 12, 11, 9, 8, 7, 6, 5, 4
3	F, 19 anni	OD -2,50 OS -2,50	OD -3,00 OS -2,50	OD: 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 0 OS: 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 1, 0
4	M, 21 Occhiali di riposo	OD -1,50 -0,50 100 OS -0,25 -0,50 89	OD -1,00 -0,50 100 OS 0,00 -0,50 90	OD 15, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 1, 0 OS 15,10,9,8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0
5	F, 32 anni	OD -1,75 -1,00 2 OS -1,25 -100 7	OD -1,75 -1,00 180 OS -1,00 -0,50 180	OD 13, 12, 11, 7, 6, 5, 4, 2, 1, 0 OS 11, 7, 6, 5, 4, 2, 1, 0
6	M, 26 anni	OD -5,25 OS -4,75 -0,50 150	OD -5,25 OS -5,00 -0,50 160	OD: 12, 10, 4 OS: 12, 10
7	F, 24 anni	OD / OS /	OD / OS /	OD: 7, 6, 5, 2, 1, 0 OS: 7, 6, 5, 2, 1, 0
8	F, 19 anni	OD -3,25 -0,75 89 OS -4,25 -0,50 80	OD -3,25 -0,75 90 OS -4,25 -0,50 85	OD: 7, 6, 5 OS: 9, 6, 5, 4, 3
9	F, 19 anni	OD / OS /	OD +1,50 -0,25 180 OS 0,00	OD 15, 14, 13, 12, 7, 5, 4 3, 2,1,0 OS 15, 14, 13 7, 5, 4, 3, 2, 1, 0
10	F, 20 anni	OD +3,00 -0,25 9 OS +3,25 -0,50 19	OD +3,00 -0,25 180 OS +3,25 -0,50 20	OD: 19,18,17,15,7,6,5,4,3,2,1,0 OS: 19,18,17,15,0,1,2,5
11	F, 22 anni Mi diceva che vedeva piú nitido il 2	OD -0,75 OS -1,00	OD -1,25 OS -1,00	OD:19,18,17,10,9,8,6,5,4,3,2,1,0 OS: 19,18,17,16,14,13,10,9,8, 7,6,5,4,3,2,1,0
12	M, 21 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS +2,00	OD 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 2, 1, 0 OS 19, 18, 17, 16, 0, 1, 0
13	F, 27 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 19, 18, 17, 16, 15, 2, 1, 0 OS 19, 18, 17, 16, 2, 1, 0
14	F, 18 anni	OD -2,25 OS -2,00 -0,50 82	OD -2,75 OS -2,75 -0,50 90	OD 8, 7, 6, 5, 0 OS 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 1, 0

15	M, 23 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 10, 9, 7, 6, 5, 4, 1, 0 OS 16, 15, 10,9 ,8,7,6,5,4, 3, 1, 0
16	F, 22 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 16, 15, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0 OS 16, 15, 7, 6, 5, 4, 3, 1, 0
17	F, 22 anni	OD -1,50 -0,25 117 OS -1,75 -0,25 90	OD -1,50 OS -1,75	OD 15, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 0 OS 15, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 1, 0
18	F, 25 anni Vede piú nitidi: 0,1,2 con entrambi gli occhi	OD 0,00 -1,25 180 OS +0,25 -0,75 5	OD 0,00 -1,25 180 OS +0,25 -0,75 5	OD 19,18,17,16,15,9,7,6,5,4,3,2,1,0 OS 19,18,17,16,15,7,6,5,4,3,2,1,0
19	M, 26 anni	OD -2,25 -1,75 32 OS -1,50 -1,50 15	OD -2,50 OS -1,00	OD 10, 9, 7, 6, 5, 4, 1 OS 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 2, 1, 0
20	F, 23 anni	OD -1,00 OS -1,25	OD -1,00 OS -1,00	OD 15, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 2 OS 15, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0
21	M, 29 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 19,18,17,15,14,13,6,5,4,1,0 OS 15,14,13,12,6,5,4,0
22	F, 22 anni	OD -1,75 OS -1,25	OD -1,50 OS -1,00 -0,25 180	OD 15, 14, 13, 11, 6, 5, 4, 2, 1 OS 14, 13, 12, 11, 7, 6, 5, 2, 1, 0
23	M, 22 anni	OD -0,75 OS -0,75	OD -1,00 OS -1,00	OD 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 1 OS 13, 12, 11, 10, 9, 3, 2, 1
24	M, 27 anni	OD -1,50 OS -1,75	OD -1,75 OS -2,00	OD 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 4, 3 OS 13, 12, 11, 10, 9, 3, 5, 4, 3
25	F, 21 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 14,13,6,5,4,3,2,1,0 OS 15,14,13,6,5,4,3,1,0
26	F, 21 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS 0,00	OD 18,19,17,14,13,6,5,4,3,2,1,0 OS 18,19, 14,13,6,5,4,3,2,1,0
27	F, 20 anni	OD -2,25 OS -2,75	OD -3,25 -0,25 145 OS -2,75	OD 14,13, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 OS 14, 13, 12, 11, 9, 8, 7, 6, 5
28	F, 22 anni	OD -5,00 -0,50 70 OS -5,25 -0,75 80	OD -6,00 -0,50 40 OS -6,00 -0,25 95	OD 14, 13, 12, 11 OS 14, 13, 12, 11
29	F, 22 anni	OD -5,75 OS -5,50	OD -5,50 -0,75 80 OS -6,25 -0,50 95	OD 14, 12, 11 OS 13, 11, 12
30	F, 23 anni	OD -0,75 -1,25 180 OS -0,75 -1,50 2	OD -1,50 -1,25 180 OS -1,00 -1,00 180	OD 14, 13, 12,11, 7, 6, 5, 4, 3,2,1 OS 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0

31	F, 20 anni	OD +1,25 -0,50 180 OS +1,25 -0,50 2	OD +0,75 -0,25 160 OS +1,00 -0,50 180	OD 16 ,14,13,12,11,9,8,6,5,4,2,1 OS 16 ,13,12,11,8,7,5,4,2,1,0
32	F, 28 anni	OD 0.00 -0.50 179 OS +1.00 -1,50 23	OD 0,00 -0,50 180 OS +1,00 -1,00 20	OD 16, 15,10,9,8,7,5,4,3,2,1, 0 OS 16 , 15,10,9,8,7,6,5,4,2,1,0
33	M, 24 anni Dice di vedere piú nitide quellle del 6 e del 5 rispetto le altre	OD -2,25 -1,25 80 OS -2,25 -0,75 145	OD -3,00 -1,25 80 OS -3,50 -0,75 145	OD 9, 8, 7, 6 , 5 , 4 , 3 , 1 , 0 OS 10, 9, 8, 7, 6 , 5 , 4 , 1 , 0
34	F, 21 anni	OD -2,75 -2,75 160 OS -1,50 -1,25 160	OD -2,75 -2,75 160 OS -2,00 -1,50 170	OD 14, 13, 12, 11, 6, 5, 4 OS 14, 13, 12, 11, 6, 5, 4
35	M, 23 anni	OD / OS /	OD 0,00 OS +0,25 -0,25 180	OD 19, 18, 17,15, 6, 5, 4, 2, 1, 0 OS 19, 18, 17, 15, 6, 5, 4, 2, 1, 0
36	F, 21 anni Dice di vedere piú nitido il 2	OD -1,00 -0,50 30 OS -1,00 -0,75 95	OD -1,00 OS -1,25 0,25 105	OD 17,15,14,13,12,11,6,5,4, 2 , 1 , 0 OS 17,15,14,13,12,11,6,5,4, 2 , 1 , 0

11. TENTATIVI

Si sono fatti diversi prove per la costruzione dell'oggetto per la misurazione della stereopsi. L'oggetto in figura 26 a consiste in una piastra di alluminio con una vite nella parte centrale che permette di situare parte dell'oggetto a una certa distanza dal resto. La vite si può posizione in modo che la parte centrale si posizioni come nel test Frisby: 1,5mm, 3mm, 6mm. Il fondo era nero con i disegni bianchi.



Figura 26 a e 26 b: Primo oggetto per misurare la stereopsi, vista frontale e laterale.



Figura 26 c: Immagine olografica del primo oggetto.

Una volta ottenuto l'ologramma abbiamo visto che si formava intorno al cerchio centrale dell'immagine un bordo brillante che marcava la differenza tra il cerchio e il fondo per questo non abbiamo potuto utilizzare questo oggetto, come si può vedere in figura 26 c.

La seconda prova consistè nell'utilizzare lo stesso oggetto invertendo i colori , come si può vedere in figura 27 a. Questo per evitare la diffusione della luce nel bordo del cecio centrale.(figure 27 a e 27 b)



Figura 27 a e 27 b: Secondo oggetto per misurare la stereopsi, vista frontale e laterale.

Una volta generato l'ologramma si è potuto vedere che il bordo non era più brillante però c'erano ombre intorno del cerchio centrale che impediva la misurazione della stereopsi. figura 27 c.



Figura 27 c: Immagine olografica del secondo oggetto.

Abbiamo provato ad eliminare l'ombra giocando con gli assi di illuminazione provando a illuminare con un solo asse da un lato e coprendo parte della immagine. Tuttavia si poteva distinguere chiaramente con un solo occhio la profondità dell'immagine, (fig. 28).



Figura 28: Immagine olografica del secondo oggetto parzialmente coperto.

BIBLIOGRAFIA

1. - P. Hariharan, *Basic of Holography*, Cambrige University Press, 2002.
- 2.- Kodikullam V. Avudainayagam, Chitrlekha S. Avudainayagam, Nichoolas Nguyen, Kian W. Chiam, and Cann Truong, “*Performance of the holographic multivergence target in the subjective measurement of spherical refractive error and amplitude of accommodation of the humman eye*”, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. **24**, No. 10, pp. 3037, 2007.
3. - Kodikullam V. Avudainayagan and Chitrlekha S. Avudainayagam “*Holographic multivergence target for subjective measurement of the spherical error of the human eye*”, Opt. Lett., Vol. **28**, No. 2, pp. 123, 2003.
4. - Kodikullam V. Avudainayagan and Chitrlekha S. Avudainayagam “*Holographic multivergence target for subjective measurement of the stigamatic error of the human eye*”. Opt. Lett., Vol. **32**, No. 13, pp. 1926 , 2007
- 5.- Barbara Argibay González, “*Optotipos Holográficos*”, Trabajo Académicamente Dirigido EUOO Universidad de Santiago de Campostela, 2008.
- 6.- Centro de Holografía de Alicante, *Holografía*, Universidad de Alicante, 1988.
7. - Anto Rosseti Pietro Gheller, *Manuale di Optometría e Contattologia*, Ed. Zanichelli, Edizione II, 2003.
8. - Theodore Grosvenor, *Optometría de Atención Primaria*, Elsevier-Masson, Primera Edición, 2004.
9. - Helena Fernández, *Estudio y optimización del almacenamiento de información en una memoria holográfica*, Tesi doctoral, Universidad de Alicante, Alicante, 2008.
- 10.- E. Fernández, M. Ortuño, S. Gallego, C. Garcíá, A. Beléndez y I. Pascual, *Comparison of peristrophic multiplexing and a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing in a thick PVA/acrylamide photopolymer for data storage*, Appl. Opt. 46, 5368-5373, (2007).