



Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea in Ottica e Optometria

TESI DI LAUREA

***La percezione stereoscopica e la sua valutazione.
Comparazione della modalità di visualizzazione e
della quantificazione della stereoacuità globale tra
stereogrammi polarizzati e monitor 3D a barriera di
parallasse.***

Relatore: Prof. Rossetti Anto

Correlatore: Prof. Stanco Luca

Laureanda: Montagner Alice

Matricola: 1069131

Anno Accademico 2015/2016

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
--------------------------	----------

CAPITOLO 1: visione binoculare e stereopsi	3
---	----------

Che cos'è la stereopsi.....	3
------------------------------------	----------

Le funzioni della stereopsi	4
--	----------

Indicatori monoculari di profondità	4
--	----------

La stereopsi a livello clinico	7
---	----------

CAPITOLO 2: le basi visive della stereopsi	9
---	----------

I tre gradi della visione binoculare	9
---	----------

Le basi visive della stereopsi.....	10
--	-----------

La fusione motoria	10
---------------------------------	-----------

La fusione sensoriale.....	10
-----------------------------------	-----------

Il processo visivo in condizioni binoculari.....	11
---	-----------

Oroptero	11
-----------------------	-----------

Disparità di fissazione e Area di Panum	12
--	-----------

Lo stimolo per la stereopsi: la disparità retinica.....	12
--	-----------

Fattori che degradano la stereopsi.....	15
--	-----------

CAPITOLO 3: le basi neuronali della stereopsi	17
--	-----------

Le basi neuroanatomiche e neurofisiologiche della stereopsi.....	17
---	-----------

La retina	17
------------------------	-----------

Il nervo ottico e il chiasma ottico	18
--	-----------

Nucleo genicolato laterale.....	19
--	-----------

La corteccia visiva.....	20
---------------------------------	-----------

CAPITOLO 4: le caratteristiche della stereopsi	23
Stereopsi fine e grossolana	23
Limiti della stereopsi	23
Stereopsi locale e globale.....	24
I test per la valutazione stereoscopica	25
I test della stereopsi	26
CAPITOLO 5: lo studio.....	29
Lo scopo	29
Soggetti	29
Apparato strumentale.....	30
La progettazione dello studio	34
Procedura	35
Pre-studio	35
Lo studio	36
Risultati	42
Discussione.....	49
CONCLUSIONI.....	53
APPENDICE A: questionario di anamnesi	54
APPENDICE B: Protocollo.....	56
BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA.....	58
RINGRAZIAMENTI.....	60

INTRODUZIONE

La percezione stereoscopica è un fenomeno binoculare che permette non solo di avere una visione solida del mondo circostante, ma soprattutto di stimare profondità e distanze.

Essendo, inoltre, l'espressione più raffinata e complessa del sistema visivo **binoculare**, è considerata come il "barometro", il segno indicatore attraverso cui monitorarne sviluppo e funzionalità.

Per questo motivo, la valutazione qualitativa e, dove possibile, quantitativa a livello clinico della stereopsi è importante, nonostante i test siano degli artefatti e la stereoacuità rilevata sia solo un'indicazione di quella che è invece la reale capacità stereoscopica del soggetto in ambiente naturale.^{(1),(2)}

Di test utilizzabili ne esistono varie tipologie e, con l'avvento delle nuove tecnologie, se ne stanno sviluppando altri sempre più all'avanguardia.

Scopo di questo lavoro sperimentale è comparare i risultati, a breve distanza (0,40m) ottenuti con un test Random-dot di ultima generazione, somministrato su Tablet 3D a barriera di parallasse, della ditta RV2-RealVision Kiewe (Milano, Italia) senza utilizzo di filtri, con quelli ottenuti con il Randot® Stereotest della Stereo Optical Co., Inc. (Chicago, USA), test che si avvale di filtri polarizzati, presente da tempo nella pratica clinica e usato quindi come gold standard, al fine di verificare se le aspettative di compatibilità tra i due test sono soddisfatte.

L'osservazione di mire in dissociazione, plausibilmente, può modificare la condizione sia di accomodazione, sia di vergenza del soggetto. Pertanto si è innanzitutto appurato, attraverso uno studio preliminare, che l'ordine di somministrazione dei due test fosse indifferente.

Sono stati raccolti i dati di stereoacuità di 110 soggetti, di età variabile tra i 12 e i 79 anni.

Il protocollo di indagine prevedeva una rapida anamnesi sotto forma di questionario, riguardante le abilità visive e il comfort a distanza prossimale,

distanza alla quale la stereopsi è più influente e utile. Ciò al fine di individuare eventuali corrispondenze tra ridotta stereopsi e disturbi visivi.

Successivamente tutti i soggetti sono stati sottoposti, con correzione in uso, a valutazioni refrattive (AV), valutazioni binoculari (forie e tropie), accomodative e di bilanciamento, allo scopo di individuare coloro i quali presentavano anomalie refrattive rispetto ai parametri scelti come valori di norma in tali ambiti. Essendo i disturbi degli ambiti refrattivo e accomodativo fattori che influiscono negativamente sulla capacità stereoscopica, si è reso necessario condurre tale indagine preliminare per selezionare solo gli individui, che non presentando problematiche, forniscono valori di stereoacuità attendibili.

Infine, i due test di stereopsi, sono stati somministrati ad una distanza fissa di 0,40m e sotto condizioni di illuminamento standard (80-110 lux).

Dei 110 soggetti iniziali, solo 75 sono stati considerati idonei ai fini dello studio ed è stata operata un'ulteriore suddivisione in due gruppi: non presbiteri e presbiteri, per evidenziare eventuali differenze sulla base dell'età e dell'invecchiamento del sistema visivo.

Dall'analisi statistica, e tenendo conto di piccoli accorgimenti (differenze di struttura e di fondo scala dei test), è emerso che i due test sono tra di loro altamente compatibili, limitatamente ai soggetti considerati, ossia con refrazione e visione binoculare nella norma.

Elaborando anche i dati della minoranza dei soggetti esclusi si nota che i risultati, oltre ad evidenziare valori di stereoacuità ridotta, sono molto eterogenei e diventa, quindi, difficile stabilire un denominatore comune. Ciò dipende dal fatto che, a seconda della tipologia delle problematiche, la risposta del sistema visivo ad uno stimolo differisce.

Lo studio perciò non solo soddisfa le aspettative di compatibilità dei test ma anche evidenzia le potenzialità del test su schermo e dimostra ancora una volta che, qualunque sia il test utilizzato, se l'efficacia del sistema visivo binoculare è in qualche modo compromessa, la performance a livello stereoscopico diminuisce.

CAPITOLO 1: visione binoculare e stereopsi

La visione serve ad **identificare** e **localizzare** gli oggetti e, l'anatomia e la fisiologia oculari e del cervello, riflettono tale dualismo.

A tal fine la binocularità gioca un ruolo fondamentale: incrementa le potenzialità della visione rispetto a quelle disponibili monocolarmente. Tra queste, l'espressione massima è rappresentata dalla stereopsi.

Che cos'è la stereopsi

La stereopsi è il supremo arbitro di tutto l'insieme di funzioni del sistema oculomotorio. È all'apice dei meccanismi refrattivi, oculomotori e binoculari⁽¹⁾ e costituisce la "percezione visiva binoculare delle tre dimensioni, determinata dalla fusione di segnali provenienti da punti retinici disparati".⁽³⁾

L'organismo umano è dotato di un sistema visivo composto da due occhi frontali che ricevono, se contemporaneamente attivi, immagini leggermente diverse di uno stesso oggetto. Tale prospettiva differenziale è nota con il nome di *parallasse* binoculare⁽⁴⁾ ed è dovuta al fatto che gli occhi sono separati orizzontalmente da una distanza di circa 6/6.5 cm nell'adulto. La disparità retinica orizzontale generata viene utilizzata per comunicare la profondità relativa degli oggetti.^{(5),(6),(7)}

Affinché la stereopsi abbia luogo devono essere presenti dei prerequisiti⁽⁵⁾: buona AV in entrambi gli occhi; estesa e binoculare sovrapposizione dei campi visivi; visione binoculare nitida e singola; presenza di movimenti oculari coordinati e coniugati e semi-decussazione delle fibre visive afferenti. Il soggetto deve fare esperienza, all'inizio della vita, nel periodo critico, della normale visione binoculare. Altrimenti, come dimostrato dagli studi sui gatti di Hubel & Wiesel,⁽⁸⁾ se tale funzione non è appresa, non pare possa essere acquisita in seguito.

In questo studio ci riferiamo a soggetti adulti.

Le funzioni della stereopsi

La stereopsi è utile per la percezione dello spazio tridimensionale e quindi per⁽¹⁾:

- giudicare la distanza, ovvero quanto distante è un oggetto da un punto di riferimento, esprimendo la misura in unità **assolute**;
- giudicare la profondità, ossia valutare la vicinanza **relativa** di due oggetti tra loro o l'intervallo di profondità relativa tra due o più punti nello spazio;
- partecipare al **riconoscimento** di oggetti solidi.

Tuttavia, non è l'unico indicatore di cui il sistema visivo si serve. Esistono, infatti, indizi di profondità di vario genere⁽⁷⁾:

- oculomotori: formati da accomodazione, convergenza e costrizione pupillare derivanti dalla contrazione dei muscoli ciliare e bulbari, sono gli unici che, da soli, forniscono informazioni precise sulla distanza assoluta. Infatti, accomodazione e convergenza, permettono di focalizzare e convergere per la distanza tra osservatore e oggetto. Nonostante ciò, hanno un ruolo limitato, nell'essere umano, nella percezione della profondità perché il range di azione di entrambe è compreso entro certe distanze;
- visivi: sono gli indizi su cui le persone fanno maggior affidamento. Si distinguono in monoculari e binoculari.

Grazie alla collaborazione di tutti questi sistemi, la percezione della profondità avviene in modo dinamico nel tempo e nello spazio e totalmente in maniera inconscia e senza sforzo.

La stereopsi appartiene al secondo gruppo di indizi e, oltre ad essere l'unica binoculare, è la più raffinata, sia per meccanismo che per tipo di informazioni fornite. Nonostante ciò possiede un limite: implicata nella percezione della distanza relativa, non è determinante per quella assoluta.⁽⁴⁾

Indicatori monoculari di profondità

A tali limitazioni suppliscono, oltre a quelli oculomotori, gli indicatori monoculari, i quali garantiscono informazioni sulle posizioni degli oggetti anche in visione monoculare. Di seguito un rapido elenco^{(1),(2),(6),(9),(10),(11)}:

- a. Dimensione: un oggetto grande è interpretato come più vicino rispetto ad uno di dimensioni inferiori;
- b. sovrapposizione: un oggetto i cui contorni occludono quelli di un altro è interpretato come più vicino;
- c. prospettiva geometrica: caratterizzata dal convergere delle linee all'aumentare della distanza;
- d. prospettiva aerea: gli oggetti più distanti appaiono di minor contrasto a causa della dispersione della luce ad opera dell'atmosfera;
- e. altezza sull'orizzonte: maggiore la altezza sull'orizzonte, maggiore la distanza;
- f. movimenti parallattici: dipendenti dai movimenti differenti, a livello retinico, delle immagini degli oggetti posti più vicini e più lontani rispetto al punto di fissazione;
- g. illuminazione e ombre: si basa sulla conoscenza a priori del posizionamento delle luci e delle forme del mondo tridimensionale;
- h. gradiente di tessitura: cambiamenti sistematici nella forma e nelle dimensioni di piccoli elementi della tessitura.

Come si nota in figura 1⁽¹²⁾, i diversi indizi di profondità agiscono all'interno di range di distanza diversi; solo cooperando forniscono informazioni funzionali.

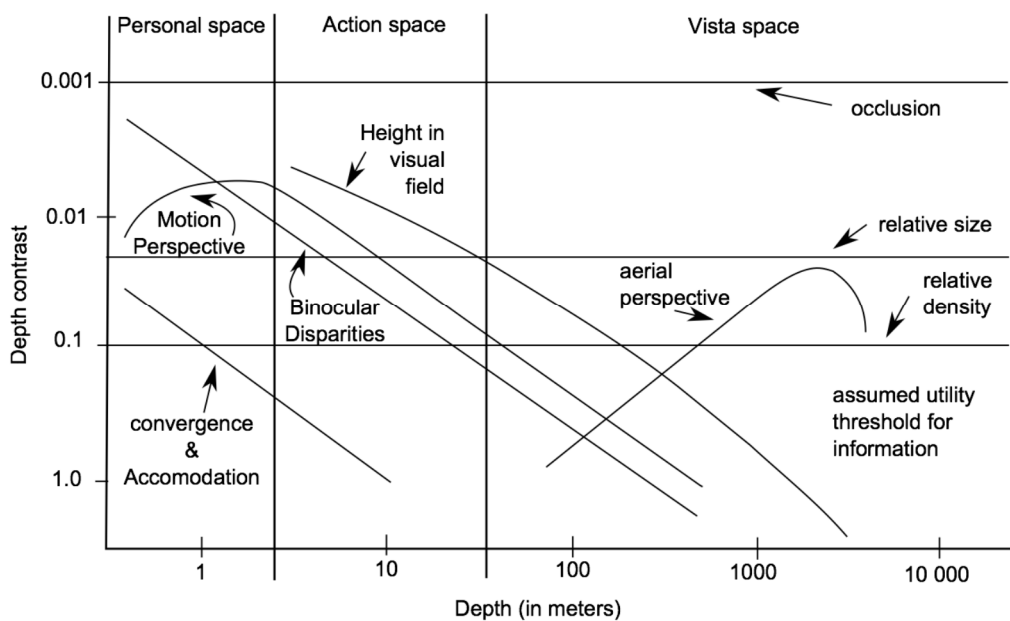


Figura 1: soglia di profondità a diverse distanze a seconda delle diverse tipologie di indicatori.

A fronte di tutto ciò, si potrebbe pensare che la visione monoculare basti da sola nel fornire tutte le informazioni necessarie per svolgere le attività quotidiane: dalle più semplici alle più specialistiche. Alcuni individui, a causa di traumi o di patologie, congenite o acquisite, sono costretti ad utilizzare unicamente un occhio; in altri la visione tra i due occhi è così differente che la fusione delle due immagini distinte da essi ricavate, è ugualmente impossibile. Per queste persone, muoversi nello spazio circostante non è, tuttavia, un'impresa impossibile. Anzi, se si riflette attentamente, essere dotati di due occhi implica varie complessità. Sono necessari un'alta coordinazione dei movimenti oculari, fusione binoculare, assenza di anisometropie e aniseiconie e soprattutto un meccanismo neurale più complesso.⁽²⁾ Quindi l'impiego di energie diventa notevole.

Nonostante ciò, possedere un sistema visivo binoculare efficiente, comporta degli enormi vantaggi. Il campo visivo aumenta di circa 30 gradi, l'AV e la sensibilità al contrasto migliorano del 10% e del 40% rispettivamente e gli effetti delle patologie oculari sono minimizzati.⁽¹³⁾ Ma il maggior vantaggio in assoluto è la possibilità di avere una percezione della profondità e della distanza molto più accurata grazie alla stereopsi⁽²⁾ che, come suggerisce il nome greco "stereos"=solido e "opsis"=vedere, è l'unica a permettere anche una **visione solida** dello spazio circostante.

L'importanza della stereopsi non si esaurisce qui. Unitamente ad un sistema visivo binoculare correttamente sviluppato, fornisce un miglior controllo motorio e informazioni cognitive più accurate e immediate.⁽⁴⁾

Ogle⁽¹⁰⁾ riporta che la disparità di fissazione è un indicatore presente già alla nascita. Per questo motivo si era pensato, inizialmente, che la percezione stereoscopica fosse una capacità innata. Tuttavia, essendo l'elaborazione di tali informazioni a carico dei neuroni e delle colonne costituenti la corteccia visiva, ed essendo che lo sviluppo di tali strutture inizia dopo la nascita, ne deriva che la stereopsi è una capacità appresa.⁽⁶⁾

Risulta, perciò, logico che qualunque ostacolo intralci l'attività dell'esperienza nella maturazione del sistema visivo, ne comprometta il normale sviluppo nella prima infanzia, avendo conseguenze a livello di stereopsi e a livello di stereoacuità

raggiungibile.^{(5),(8)} Sulla base delle considerazioni fatte fino a questo momento, la mancanza di normale binocularità a seguito di strabismo, ambliopia, traumi, patologie di varia natura a carico di un occhio solo, non solo si traduce in una visione prettamente o prevalentemente monoculare, ma si ripercuote anche a livello di coordinazione corporea (per es. coordinazione occhio-mano).⁽¹⁰⁾

La stereopsi a livello clinico

Ultimo aspetto, ma non di minor importanza, è la rilevanza assoluta dall'indagine della stereoacuità a livello clinico.

Infatti, essa assume un valore aggiuntivo per i professionisti della visione: essendo la massima capacità del sistema visivo binoculare, è il miglior indicatore del funzionamento complessivo sia della porzione motoria che sensoriale.

Clinicamente serve a:

- rilevare anomalie binoculari⁽¹⁴⁾;
- monitorare i progressi di una terapia visiva⁽¹⁴⁾;
- indagare se il sistema visivo è ben sviluppato e valutare l'allineamento oculare, soprattutto nei bambini.⁽¹⁵⁾

I risultati ricavati dalla somministrazione dei test sono esplicativi⁽¹⁶⁾:

- stereoacuità pari a 40", 30", 20" è indicativa di fissazione bifoveale e di un sistema binoculare armonioso;
- percezione stereoscopica povera o assente induce a sospettare deviazioni mal compensate o ambliopia;
- stereopsi in presenza di eterotropia implica la presenza di CRA.

CAPITOLO 2: le basi visive della stereopsi

Dei cinque sensi, la visione è quella che permette di orientare e localizzare noi stessi relativamente agli oggetti circostanti al fine di muoverci e compiere attività in sicurezza. Tuttavia, nessuna delle abilità visive riesce ad eccellere sull'argutezza della stereopsi. Attraverso l'utilizzo delle informazioni di disparità binoculare è possibile esprimere giudizi fini sulla profondità, cosa che sarebbe altrimenti impossibile.⁽⁷⁾

I tre gradi della visione binoculare

L'idea che quello della visione binoculare non fosse un processo semplice, era già stata suggerita dal tentativo di Worth (1915) di porre ordine, gerarchizzando, tra i suoi fenomeni sensoriali. Per necessità clinica egli creò una classificazione che distinguesse i tre gradi della fusione (o percezione binoculare)⁽⁶⁾:

- I. *percezione simultanea*: capacità di percepire contemporaneamente le immagini dei due occhi;
- II. *fusione*: grazie all'attività dell'apparato muscolare serve ad allineare gli assi visivi per far cadere le immagini su aree retiniche corrispondenti (aspetto motorio), così da permettere poi a livello psichico, di ricavare una rappresentazione singola e unitaria (componente sensoriale);
- III. *stereopsi*: percezione della profondità e della posizione dell'oggetto nello spazio ricavata grazie all'analisi della disparità retinica orizzontale sussistente tra le due immagini, lievemente diverse, di uno stesso oggetto, registrate dai due occhi.

Da un punto di vista teorico, definire la stereopsi come "terzo grado della fusione" non è propriamente corretto, in quanto risulta fondamentale per la diagnostica di problematiche relative agli oculomotori ed è considerata l'apice delle capacità fusionali. Inoltre, un certo grado di stereopsi grossolana è comunque presente in condizioni diplopiche, quando la normale fusione sensoriale non c'è.⁽¹⁾ Tuttavia, la scelta risulta, invece, adeguata se si considera l'ambito clinico, in cui i professionisti si occupano prevalentemente della stereopsi fine (piccole disparità

angolari), la quale si manifesta solo se tutti, o quasi, i contributi della binocularità lavorano in modo eccellente.

Per capire il meccanismo che rende possibile tutto ciò, si deve tener conto di due aspetti: la natura dello stimolo per la stereopsi e la natura dei processi mentali che registrano ed elaborano tali informazioni.

Le basi visive della stereopsi

Come in parte già esposto, il sistema visivo umano è binoculare. Dotato di due occhi posti frontalmente, distanti l'uno dall'altro circa 6 cm, percepisce di uno stesso oggetto due immagini leggermente diverse che cadono una nella retina di un occhio e l'altra in quella del controlaterale. Grazie alla sovrapposizione e alla fusione di tali immagini a livello dei centri corticali superiori, viene restituita una percezione unitaria dell'oggetto solido collocato in uno spazio tridimensionale, con relative informazioni riguardanti distanza e profondità. La percezione che si ha è quella di vedere il mondo attraverso un unico occhio posto tra le due posizioni anatomiche reali degli occhi. Da qui l'espressione "visione ciclopica".⁽⁴⁾

Affinché ciò sia possibile, la visione binoculare deve essere intatta nella sua componente motoria e sensoriale. Inoltre, una buona performance stereoscopica è garantita se non sono presenti errori di natura refrattiva e accomodativa.

La fusione motoria

La fusione motoria si attua grazie all'azione del sistema della muscolatura estrinseca, la cui funzione è quella di allineare entrambe le fovee verso l'oggetto di interesse all'interno del campo visivo e di mantenere tale posizione per il tempo richiesto.⁽¹³⁾ I movimenti di vergenza rappresentano la risposta alla disparità retinica dell'oggetto di interesse e hanno il fine ultimo di mantenere ogni immagine in punti corrispondenti così da permettere alla fusione sensoriale di avere luogo.⁽¹⁰⁾ Similmente per i movimenti di versione.

La fusione sensoriale

La fusione sensoriale si riferisce al processo attraverso il quale le immagini formatesi a livello retinico nei due occhi sono combinate in un singolo percetto. Tuttavia, non si sa ancora se, una volta che le fibre nervose provenienti da punti

retinici corrispondenti si incontrano a livello della corteccia visiva, la fusione avvenga su basi fisiologiche o per risposte fisiche.⁽¹⁰⁾

Il processo visivo in condizioni binoculari

Il processo visivo inizia con la fissazione bifoveale di uno stesso punto nello spazio. I punti immagine che si formano a livello retinico vengono interpretati come se fossero frontali.

Tutti gli oggetti compresi all'interno della porzione binoculare del campo visivo cadono su punti retinici corrispondenti, ovvero punti che hanno la stessa direzione visuale e che inviano i loro impulsi nervosi allo stesso punto nella corteccia visiva,⁽¹⁰⁾ dando luogo alla fusione sensoriale.

Oroptero

Stabilito un punto di fissazione F, l'insieme dei punti oggetto che formano immagini su paia di punti retinici corrispondenti (A e B), viene definito oroptero (Figura 2). Ne esistono due tipi: uno teorico di forma circolare detto cerchio di Vieth-Muller, e uno empirico, di forma conica che viene determinato sperimentalmente.

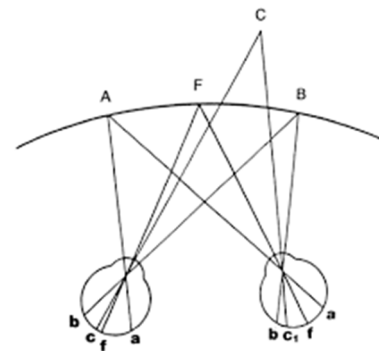


Figura 2: oroptero. F è il punto di fissazione; A e B punti appartenenti all'oroptero.

I punti che si trovano all'esterno, invece, sono visti doppi in quanto stimolano punti retinici non-corrispondenti. La diplopia così generatasi è fisiologica.

Poiché le immagini a livello retinico si formano capovolte e invertite, la localizzazione dell'oggetto è opposta all'area stimolata.⁽⁶⁾

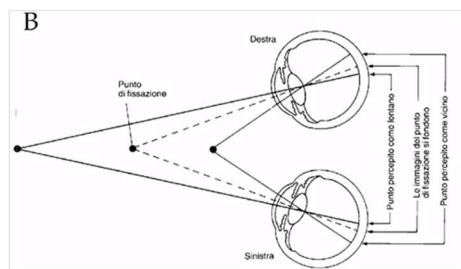


Figura 3: diplopia fisiologica: omonima e crociata.

Un punto posto oltre l'oroptero stimola aree nasali non corrispondenti; un punto tra l'oroptero e il soggetto stimola aree temporali non corrispondenti. Nel primo caso si parla di diplopia omonima, nel secondo si dice crociata (Figura 3).

Disparità di fissazione e Area di Panum

Non sempre gli occhi si allineano perfettamente sul punto di fissazione. Spesso capita che uno dei due o entrambi non dirigano l'asse visuale sullo stesso punto. Tale imperfezione prende il nome di *disparità di fissazione*.

Nonostante ciò, la fusione sensoriale avviene. Questo accade perché attorno all'oroptero esiste un volume di tolleranza, determinabile sperimentalmente, chiamato storicamente Area di Panum, dal nome di chi ne osservò per primo il fenomeno nel 1858⁽⁶⁾.

È negli anni Novanta che si capisce la portata di tale scoperta: i punti corrispondenti non sono in realtà punti ma aree costituite da centinaia di fotorecettori. ⁽¹⁰⁾ Un'area fusionale ampia 8' e posta a 1° dalla fovea contiene circa 300 coni.

A partire da Panum, si stravolse, perciò, il concetto di oroptero che risultava così essere non più una superficie ma un solido.

Inizialmente si pensava che la zona di visione binoculare singola avesse limiti definiti. Ogle⁽¹⁰⁾, invece, fu fautore di una teoria probabilistica. Sugerì che i suoi limiti fossero considerati come un gradiente nel quale, la probabilità di avere visione binoculare singola, aumenta verso il centro della zona.

Lo stimolo per la stereopsi: la disparità retinica

L'analisi della separazione in profondità tra due oggetti avviene, in parte, grazie ad informazioni presenti a livello retinico.

La stereopsi è l'unico indizio binoculare per la profondità davvero rilevante. Si verifica quando le immagini di un punto oggetto sono formate su punti retinici non-corrispondenti che sono vicini tra di loro (Figura 4) in modo da non eccedere l'Area fusionale di Panum.⁽²⁾

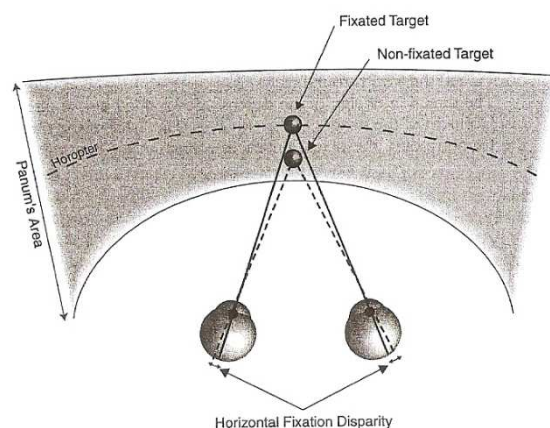


Figura 4: punti retinici corrispondenti e non-corrispondenti all'interno dell'Area di Panum.

Si considerino due oggetti all'interno dello spazio visivo binoculare posti a distanze diverse rispetto l'osservatore, ovvero che presentano una differenza in distanza tra di loro. Se ne scelga uno dei due come punto di fissazione. Le sue immagini cadranno su punti retinici corrispondenti grazie alla fusione motoria e restituiranno un percetto unitario grazie alla fusione sensoriale. Il secondo, invece, produrrà immagini che non sono esattamente nella medesima posizione nelle due retine cadendo su punti non-corrispondenti. Nonostante ciò, vengono fuse per dare percezione unitaria perché giacenti entro l'area di Panum. Tuttavia, invece di essere percepito come facente parte dell'oroptero, il sistema visivo gli assegnerà una profondità diversa rispetto all'oroptero. È la differenza in separazione laterale tra la posizione del punto fissato e quello non fissato a permettere al sistema di stimare di quanto l'oggetto è spostato dall'oroptero. ⁽²⁾

Quindi, lo stimolo da cui origina la stereopsi è la *disparità retinica orizzontale*, che consiste nella trasposizione retinica dell'intervallo di profondità tra due punti oggetto, quantificato in unità angolari. Se la distanza relativa tra i due punti oggetto fosse tale da eccede l'area di Panum, si avrebbe diplopia fisiologica.

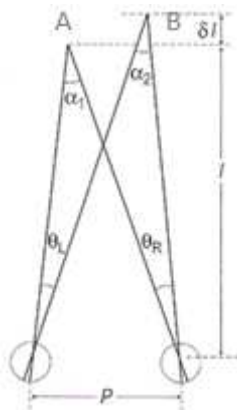


Figura 5: geometria della stereopsi.

Anche se il meccanismo è quasi totalmente a carico del sistema neurale e in particolare dei neuroni binoculari, se ne illustrerà ora la componente geometrica (Figura 5).

Supponendo di avere due punti, A e B, alla distanza l e $l + \Delta l$ dall'osservatore, le separazioni angolari degli oggetti al punto nodale dell'occhio destro e sinistro sono θ_R e θ_L . La differenza $\Delta\theta$ tra gli angoli, o disparità, è:

$$\Delta\theta = \theta_R - \theta_L = \alpha_1 - \alpha_2$$

Approssimando tutti gli angoli come se fossero piccoli ($l \gg p$), la disparità angolare risulta:

$$\Delta\theta = \left(\frac{p}{l}\right) - \left(\frac{p}{l + \Delta l}\right) \approx \frac{p\Delta l}{l^2} \quad \text{oppure} \quad \Delta l = \frac{l^2}{p} \Delta\theta$$

dove p è la distanza interpupillare.

Come si può notare la capacità di rilevare che due punti sono a distanze diverse dipende dal minimo valore di $\Delta\theta$ che può essere apprezzato. In generale, nonostante possa variare sulla base della distanza del target o della natura del compito, tale parametro ha un valore approssimativamente di 10". Tale abilità è definita *acuità stereoscopica*, ovvero "l'abilità di discriminare differenze di profondità molto fini come risultato di una disparità geometrica retinica".⁽⁴⁾ La stereopsi è quantificata come la minima disparità geometrica che elicitava una sensazione di profondità.

Essa ha valore in un range di poche centinaia di metri, mentre è meno importante a distanze maggiori. In particolare, la sua massima funzionalità la si riscontra per una distanza circa pari alla lunghezza delle braccia. La maggiore dimensione degli angoli di parallasse in visione prossimale causa una disparità maggiore; per gli oggetti a distanza elevata, invece, sulla base della soglia per la disparità angolare, si richiederebbe una distanza maggiore di separazione tra questi.⁽¹⁷⁾ Infatti, come si deduce dal grafico in figura 6, la minima differenza di profondità discriminabile (Δl) è funzione della distanza (l).

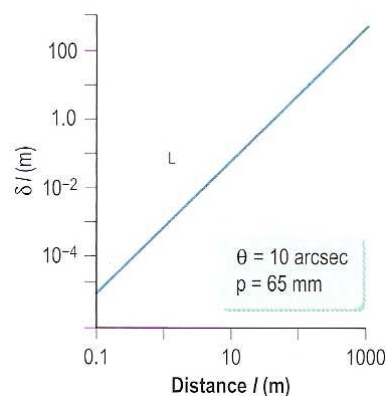


Figura 6: fissata la differenza angolare e la distanza interpupillare, la minima differenza discriminabile è funzione della distanza.

Per esempio, un soggetto con una distanza interpupillare di 0,06m e stereocucità di 20" riuscirà a percepire come distinto dall'infinito, un punto lontano 619 m.⁽⁴⁾

L'entità della disparità retinica dipende dalla distanza tra gli oggetti osservati: se

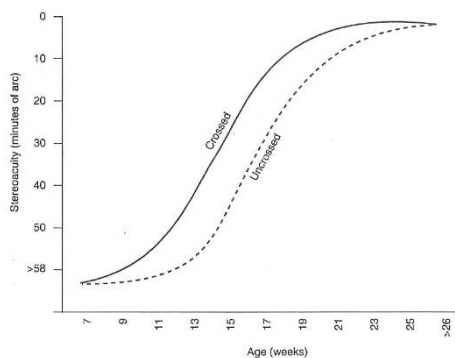


Figura 7: sviluppo della disparità nelle prime settimane di vita.

l'oggetto si trova di fronte al punto di fissazione, produrrà immagini nelle emiretine temporali; mentre se è oltre rispetto a tale punto, l'immagine cadrà nelle emiretine nasali. Nel primo caso si parlerà di disparità crociata, nel secondo di omonima.

Come si nota dalla figura 8, nelle prime settimane di vita, la disparità crociata si sviluppa prima di quella omonima.

Di norma i test valutano la disparità crociata. Ruotando sotto-sopra il test, però, si può testare anche quella omonima.⁽⁵⁾

Quindi, il tipo di disparità (omonima o crociata) specifica se gli oggetti si trovano posizionati prima o dopo il punto di fissazione, mentre la quantità di disparità specifica di quanto gli oggetti sono separati in profondità.

Esistono punti oggetto del campo visivo che sono collocati in modo da dare disparità retinica zero, disparità che non è né crociata né omonima. Ciò sta a significare che la separazione laterale tra gli oggetti visti dall'occhio destro è uguale a quella tra gli oggetti visti dall'occhio sinistro.⁽⁷⁾

Se la separazione laterale è identica nei due occhi, la loro differenza darà zero. Le immagini saranno quindi formate su punti corrispondenti e gli oggetti a cui appartengono sono collocati alla medesima distanza dall'osservatore.

Se quelli di cui si è parlato prima erano percepiti a distanze diverse, questi invece saranno collocati alla stessa distanza rispetto al punto di fissazione.

L'oroptero assume un ruolo, perciò, rilevante: essendo il centro della regione stereoscopica è anche il centro della più alta stereoacuità.⁽⁴⁾

Fattori che degradano la stereopsi

Fino ad ora si sono viste alcune delle basi della stereopsi. Se i valori di stereopsi rilevati dall'analisi visiva non sono ottimali, significa che ci possono essere delle problematiche relative ai sistemi accomodativi e di vergenza (principalmente) o nelle vie di trasduzione ed elaborazione dell'informazione visiva. È interessante soffermarsi a riflettere brevemente su alcuni di questi fattori che possono inficiarne il funzionamento.

Di seguito una panoramica.⁽¹⁾

- Strabismo ($\alpha > 10$ dp): a causa dell'angolo di strabismo troppo elevato non sono presenti abilità stereoscopiche affidabili né in pattern locali né globali;

- Strabismo ($\alpha < 10$ dp): l'angolo di minore entità, permette di rilevare stereopsi di circa $1'$ nei test di stereopsi locale ma non globale. È presente cioè un certo grado di stereopsi grossolana;
- Disparità di fissazione: all'aumentare della disparità di fissazione, aumenta la soglia stereoscopica (diminuisce la stereoacuità);
- Contrasto: alla diminuzione del contrasto corrisponde un aumento del valore di soglia;
- Annebbiamento ($\geq 0.50D$ OO): l'annebbiamento riduce la stereoacuità. Se è diverso nei due occhi, il sistema visivo dimostra ancora più difficoltà, in quanto si instaura un processo di soppressione;
- Ridotta AV: differenze significative in AV come quelle dei soggetti strabici, ambliopi e anisotropi, si può pensare derivino da difetti di sensibilità al contrasto per le alte frequenze spaziali. Questo diminuisce la prestazione;
- Eteroforie: indipendente dalle piccole exoforie, la stereoacuità risente, invece, della presenza di piccole esoforie. Per forie verticali anche di entità limitata, si registra una riduzione drastica della stereoacuità. Essendo che queste ultime influiscono anche sulla disparità di fissazione verticale, la stereopsi risultante è una combinazione delle due;⁽¹⁾
- Soppressione: è un fenomeno che dipende dalla natura dello stimolo e dalla struttura del test. Qualunque sia l'entità dell'area di soppressione, la regione interessata è sempre la retina centrale, zona responsabile della massima acuità stereoscopica.
- Aniseiconia: una differenza dell'1% nella magnificazione delle immagini retiniche tra i due occhi è sufficiente per ridurre la capacità stereoscopica;
- Fatica fisica e mentale: l'affaticamento modifica la disparità di fissazione che ha ripercussioni negative, di conseguenza, nella stereopsi;
- Età: dopo i 60 anni si registra una riduzione nell'acuità stereoscopica associata alla perdita della sensibilità al contrasto, dovuta principalmente alla opacità dei mezzi. Fattori quali lo stato mentale e l'attenzione possono essere considerati come ulteriori cause.

CAPITOLO 3: le basi neuronali della stereopsi

L'importanza della disparità retinica non si risolve in retina: le informazioni da essa dipendenti vengono analizzate nei vari stadi delle vie visive.

Se in sede retinica sono codificate, è solo grazie all'elaborazione corticale che le informazioni vengono comprese e tradotte in percezione stereoscopica.

Le basi neuroanatomiche e neurofisiologiche della stereopsi

Lo stimolo al quale l'occhio è sensibile è la luce. Emessa o riflessa dall'oggetto osservato, la radiazione elettromagnetica si propaga nello spazio ed entra nell'occhio grazie ad una apertura adibita: la pupilla. Attraversando strutture quali cristallino e umor vitreo, giunge ad incidere sulla retina.

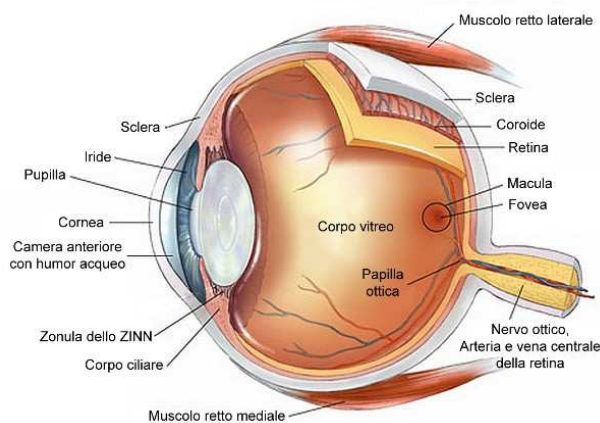


Figura 8: anatomia del bulbo oculare.

costituiscono i nove strati di cui è composta: i fotorecettori (coni e bastoncelli), le cellule bipolari, gangliari, orizzontali e amacrine.

Lo scopo del tessuto è di trasformare lo stimolo luminoso incidente in segnale elettrico.⁽⁶⁾ Affinché ciò accada, la luce deve attraversare tutti gli strati e giungere ai fotorecettori.

Sono loro, infatti, le uniche cellule fotosensibili, grazie alla presenza di

La retina

La retina è una delle tre tuniche che delimitano il bulbo oculare ed è posta tra coroide e umor vitreo (Figura 9).

Struttura trasparente e stratificata, rappresenta una estroflessione del cervello.⁽¹⁸⁾ Ci sono cinque tipi di cellule che

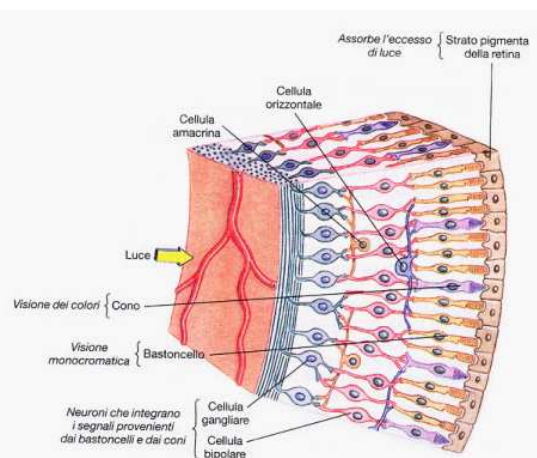


Figura 9: cellule retiniche.

fotopigmenti (es. rodopsina), i quali rendono possibile la fototrasduzione del segnale luminoso. Attraverso un meccanismo di iperpolarizzazione, il segnale passa alle cellule bipolari che lo inviano a loro volta, alle cellule gangliari. Queste sono le uniche cellule retiniche ad essere dei neuroni. L'insieme dei loro assoni costituisce la via efferente della retina. Cellule orizzontali e amacrine, grazie a meccanismi di inibizione laterale, modulano la trasmissione del segnale. Per questo vengono considerate come il primo nucleo in cui l'informazione visiva viene modificata.

Le cellule gangliari, però, si differenziano in vari tipi: cellule gangliari di tipo M (5%), di tipo P (90%) e non M-non P (5%). La diversità sta nel fatto che le prime hanno un campo recettivo più ampio, conducono più velocemente i potenziali d'azione e sono sensibili al basso contrasto. Rispondono alla stimolazione con una scarica transiente e servono per la rilevazione del movimento. Le seconde invece, producono una scarica sostenuta e prolungata e sono sensibili a forma e dettagli fini dello stimolo. Tale distinzione si troverà anche a livello del Nucleo Genicolato Laterale (NGL).

Il nervo ottico e il chiasma ottico

Gli assoni delle cellule gangliari lasciano la retina attraverso la papilla e si riuniscono a formare il nervo ottico, composto da circa un milione di fibre. Al suo interno l'impulso viene trasportato mediante un processo biochimico che modifica la permeabilità di membrana: la depolarizzazione. Passando attraverso il forame ottico lascia l'orbita e si dirige verso lo spazio subaracnoideo. Qui danno origine ad una conformazione quadrangolare sopra la sella ossea che raccoglie l'ipofisi: il chiasma ottico.⁽¹⁹⁾ Costituito dall'incrocio dei nervi ottici, va a formare i tratti ottici. Presso il chiasma, gli assoni originatisi nelle emiretine nasali si incrociano passando all'emisfero opposto. Quelle temporali invece, non incrociano. Avviene cioè una semidecussazione delle fibre del nervo ottico. I tratti ottici saranno perciò formati dalle fibre provenienti dalle metà omonime delle retine. Alcuni saranno diretti al collicolo superiore, stazione di integrazione di diversi segnali sensoriali atti a produrre in risposta una serie movimenti oculari, altri al talamo e altri ancora al NGL.

Nucleo genicolato laterale

Il NGL è la sede in cui le fibre che originano dalle cellule ganglionari retiniche entrano in sinapsi con i neuroni i cui assoni costituiscono le radiazioni ottiche. Il genicolato destro riceve le informazioni dal campo visivo sinistro e viceversa. Il genicolato è diviso in 6 strati:

- Strati 1 e 2 formati da cellule di tipo M;
- Strati 3, 4, 5, 6 formati da cellule di tipo P.

A questo livello, gli input provenienti dai due occhi vengono tenuti separati e si mantiene una organizzazione retinotopica, dove gli assoni ipsilaterali fanno sinapsi con le cellule degli strati 2, 3, 5 mentre quelli contralaterali con le cellule degli strati 1, 4, 6. In aggiunta, numerosi neuroni di piccole dimensioni giacciono ventralmente rispetto a ciascun strato, formando gli strati detti “koniocellulari”, ricevuti input da cellule gangliari e retiniche non M-non P.

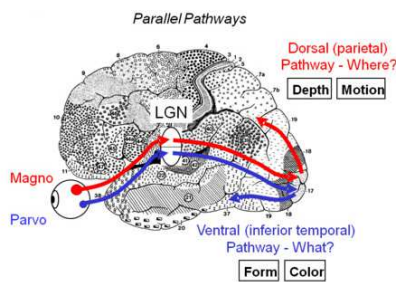


Figura 10: sistemi magno e parvocellulari.

Si può quindi affermare che la modalità di trasmissione del segnale si articola in due sistemi diversi, magno e parvocellulare, deputati a svolgere ruoli distinti: il primo serve per la localizzazione, il secondo per il riconoscimento.

La seguente tabella ne illustra le principali differenze:

Tabella 1: Sistema Parvo e Magnocellulare

	Neuroni della via parvo	Neuroni della via magno
Anatomia	Maggiori afferenze dal centro del campo visivo	Maggiori afferenze dalla periferia del campo visivo
	85-90% nel NGL	10-15% nel NGL
Funzione	Campi recettivi più piccoli	Campi recettivi più grandi
	Risposta sostenuta	Risposta transiente
Funzione	Più sensibili alle alte frequenze spaziali	Più sensibili alle basse frequenze spaziali
	Più sensibili alle basse frequenze temporali	Più sensibili alle alte frequenze temporali
Funzione	Sensibili al colore	Ciechi al colore
	Più attivi nel centro del campo visivo	Più attivi alla periferia del campo visivo
Funzione	Meno attivi in visione scotopica	Attivi anche in visione scotopica
	Maggiore risposta per stimoli statici	Maggiore risposta per stimoli in movimento
Funzione	Via di <u>processamento</u> per colore e dettaglio/forme	Via di <u>processamento</u> per movimento, localizzazione e profondità

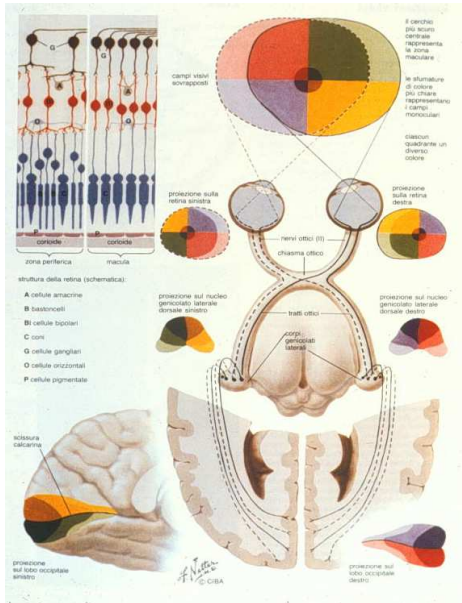


Figura 11: il percorso dell'informazione visiva.

La differenza di sostanziale interesse è che i neuroni P, che proiettano allo strato 4C beta dell'area 17, sono responsabili della trasmissione di informazioni per la visione dei colori e della risoluzione spaziale. Sono, invece, i **neuroni M** ad essere deputati al riconoscimento dei movimenti, della **stereopsi** e della sensibilità al contrasto. Proiettano allo strato 4C alfa dell'area corticale 17. Anche a livello corticale persiste la suddivisione degli input (Figura 11).

Il NGL è la seconda stazione di controllo del segnale ed è qui che avviene la prima elaborazione degli impulsi provenienti dagli occhi per quanto concerne percezione del movimento, dei colori e **visione stereoscopica**. A questo livello inizia a formarsi la binocularità e in questa sede è perciò possibile l'attività inibitoria e quindi la soppressione.⁽⁶⁾

La corteccia visiva

La corteccia visiva primaria è una parte di cervello localizzata in sede occipitale, a livello della nuca. La si può individuare spostandosi di due "dita" in alto rispetto all'inion, protuberanza ossea nella parte posteriore e centrale alla base del cranio. Lì risiede la corteccia visiva primaria (V1).

A livello del lobo occipitale si trova, infatti, la corteccia striata (V1-area 17 di Brodmann) detta così per la presenza della stria bianca di Gennari, visibile nelle sezioni fresche. Risulta suddivisa in una metà destra e una sinistra, porzioni ulteriormente divise in parte inferiore e superiore dalla scissura calcarina. Adiacenti ad essa si trovano l'area V2 (Brodmann 18), l'area V3, V4 e V5/MT (nell'insieme: Brodmann 19).

Se l'area V1 è deputata alla visione centrale e al riconoscimento di immagini, le altre aree intervengono analizzando e integrando le stesse. La rappresentazione dei 30° centrali di retina occupa l'80% della corteccia visiva (magnificazione corticale).

I corpi cellulari dei neuroni della corteccia striata sono disposti in 6 strati.

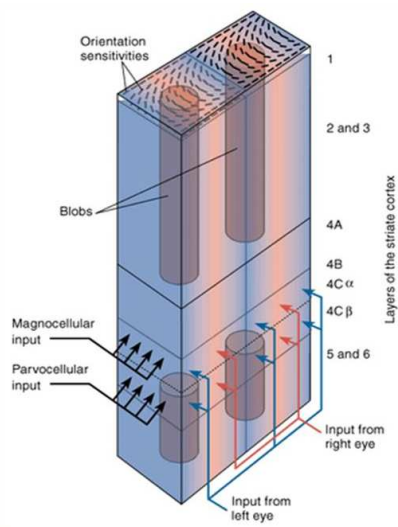


Figura 12: gli strati e le colonne della corteccia visiva primaria.

Le afferenze dal NGL formano sinapsi soprattutto nella IV lamina corticale e questo garantisce il mantenimento dell'organizzazione retinotopica del genicolato. I neuroni parvocellulari proiettano al 4C beta, quelli magnocellulari al 4C alfa, creando una sovrapposizione di mappe retinotopiche (Figura 12). I neuroni del 4C proiettano poi al 4B e al 3 dove, per la prima volta, si combina l'informazione proveniente dai due occhi. Tuttavia, la suddivisione tra magno e parvo continua ad esistere in quanto lo strato 4C alfa proietta principalmente in 4B, mentre 4C beta proietta in 3.

Mentre i neuroni dello strato 4C alfa (dette cellule semplici) rispondono a stimolazioni monoculari, quelli dello strato 4B, grazie a campi recettivi binoculari, producono risposte elicitate da stimolazioni provenienti da entrambi gli occhi.

È quindi in sede corticale che le informazioni provenienti da entrambi gli occhi cominciano ad essere elaborate grazie alla presenza di neuroni binoculari.

Ulteriori neuroni di tale genere sono quelli appartenenti allo strato 3, chiamati cellule complesse.

Cellule semplici e complesse si organizzano a formare delle colonne. Esistono colonne che rispondono a stimoli che presentano disparità retinica, ovvero sono la base della stereopsi.

La funzione dei neuroni binoculari è quella di confrontare le caratteristiche monoculari e di computare la disparità.⁽⁷⁾ Per di più, sono state scoperte cellule che rispondono meglio per stimoli di disparità retinica zero, altre invece per stimoli che cadono su punti non-corrispondenti e sono suddivise tra quelle che sono selettive per la disparità crociata e quelle per la disparità omonima.

Infine, le aree 17, 18 e 19 (V1-V5) di un emisfero sono interconnesse con le corrispondenti dell'emisfero controlaterale. L'integrazione delle informazioni elaborate indipendentemente dai due emisferi cerebrali è resa possibile dal corpo calloso, spessa lamina composta da fasci di fibre mieliniche.

Se fino al 1950 si pensava che la sua funzione fosse solo quella di unire aree corticali corrispondenti, si capì invece grazie a Whitteridge⁽⁹⁾, pochi anni dopo, che le connessioni callosali determinano una sovrapposizione dei territori dei due campi visivi che proiettano ai due emisferi. Nel 1968 Berlucchi e Rizzolati, compresero che il corpo calloso cementa insieme le due metà del mondo visivo e che ogni cellula con connessioni callosali riceve input con proprietà complementari dalle cellule dell'emisfero opposto.

La stereopsi quindi, è un fenomeno che ha luogo grazie alla presenza di neuroni binoculari, appartenenti alla corteccia visiva, e di strutture quali chiasma ottico e corpo calloso. Se si recidesse il corpo calloso si produrrebbe cecità per la visione della profondità nella regione di campo visivo mediale; se il taglio fosse fatto all'altezza del chiasma ottico si avrebbe cecità nelle regioni temporali mentre, al di qua del punto di fissazione, la stereopsi rimarrebbe presente.

CAPITOLO 4: le caratteristiche della stereopsi

Stereopsi fine e grossolana

Sulla base di studi e ricerche⁽⁴⁾ la percezione stereoscopica deriva dall'attività combinata di due componenti psicologiche: la stereopsi fine e quella grossolana. Alla base ci sono il sistema parvo e magnocellulare rispettivamente.⁽²⁾

A qualunque eccentricità, la stereopsi fine risponde a pattern di frequenze spaziali maggiori, a minori disparità (<30') e a target statici, inoltre domina la visione foveale, supporta le alte acuità stereoscopiche e le immagini devono avere simili forme e dimensioni affinché si manifesti.

La stereopsi grossolana risponde in modo più efficace a pattern con basse frequenze spaziali, disparità maggiori (da 30' a 10°) e target in movimento. Può essere attivata sia da target di forme simili che dissimili. Persone prive di stereopsi grossolana possono avere una stereopsi fine totalmente funzionante e viceversa.⁽⁴⁾

Un'ulteriore distinzione consiste nel differenziare la stereopsi centrale da quella periferica. La prima lavora a $\pm 0.5^\circ$ dalla fovea e rileva piccole disparità al punto di fissazione. La seconda, invece, opera in un range compreso tra $\pm 7^\circ$ e $\pm 10^\circ$ dalla fovea ed è selettiva per le grandi disparità.

Limiti della stereopsi

La stereopsi è dotata di due limiti: uno superiore e uno inferiore.

Il limite inferiore è rappresentato dalla stereoacuità, ovvero la minima disparità che può essere percepita.

Definire il limite superiore richiede delle premesse.

Si è visto precedentemente che all'esterno dell'area di Panum, si ha percezione diplopica, tuttavia questo non esula dal poter percepire la profondità.

All'interno dell'Area di Panum si ha una solida percezione della profondità (stereopsi quantitativa), la cui entità aumenta all'aumentare della disparità binoculare. Al di fuori di questa, si può ugualmente capire se un oggetto è più

vicino o lontano rispetto al punto di fissazione, sfruttando la tipologia di diplopia, crociata o omonima (stereopsi qualitativa). Il tutto va a violare la classificazione di Worth: si ha stereopsi senza fusione. Vari esperimenti condotti⁽²⁾ hanno dimostrato che la relazione lineare tra l'entità della profondità percepita e della disparità cessa di essere verificata al di fuori di tale area. Inizialmente, oltre tale limite, la proporzionalità è ancora diretta, poi raggiunto un determinato valore, la relazione si inverte e quindi al crescere della disparità diminuisce la percezione della profondità fino ad arrivare al limite superiore di 1000' per il quale la disparità non suscita più sensazione di profondità.

Stereopsi locale e globale

La stereopsi contribuisce anche al riconoscimento di pattern.⁽⁴⁾ In certe condizioni visive, la distribuzione della disparità geometrica nelle immagini binoculari può rilevare la presenza di forme che non sarebbero altrimenti individuabili e riconoscibili. Ne sono esempio tutti i test formati da stereogrammi con pattern randomizzati. Il sistema visivo deve computare un'enorme quantità di disparità dell'immagine all'interno del campo visivo binoculare. Il processo prende il nome di stereopsi globale. Viceversa, se indizi come colore e contrasto permettono di distinguere una forma dallo sfondo, il processare la sola disparità nelle immediate vicinanze di questa è sufficiente a rivelare la sua profondità. Questo processo, noto come stereopsi locale, permette di apprezzare la profondità in stereogrammi costituiti da semplici linee.

I test clinici basati sulla stereopsi globale richiedono la presenza sia della stereopsi fine che grossolana, mentre quelli locali richiedono solo la stereopsi fine. Infatti, mentre nella stereopsi locale basta unire punti simili a cui associare le disparità, nella globale vengono confrontate tra loro aree maggiori in cui sono combinati quelli con disparità simile e si ottiene la profondità. Queste differenze riflettono processi binoculari distinti alla base.

Dagli studi di Poggio sulle scimmie⁽²⁰⁾ si scoprì non solo che i neuroni binoculari in V1 e V2 si dividono in tre classi (i neuroni tuned che rispondono per disparità minime o nulle e i neuroni far e near, per stimoli posti dietro o davanti al punto di

fissazione), ma anche che a livello corticale l'analisi visiva è attuata grazie ad operazioni computazionali. Poiché i neuroni sono capaci di segnalare il corretto confronto tra punti corrispondenti nei due occhi scegliendo tra una moltitudine di falsi contorni, si deduce che la stereopsi non avviene per attivazione indipendente dei singoli neuroni, ma chiede l'intervento di meccanismi globali.

I test per la valutazione stereoscopica

Due sono gli aspetti valutabili della stereopsi:

- quantitativi: rappresentazione dell'angolo di disparità stereoscopica in secondi d'arco;
- qualitativi: come varia la stereopsi nel tempo e sotto diverse condizioni (es. velocità di percezione della profondità stereoscopica).

Attualmente, ci si serve di una moltitudine di test per la valutazione della stereopsi. Fu il fisico inglese Charles Wheatstone a capire nel 1838 che è possibile ricavare la percezione stereoscopica a partire da due immagini piatte. Non a caso fu l'inventore dello stereoscopio. La prima ipotesi prevedeva che la visione stereoscopica si basasse su confronti binoculari tra i contorni degli oggetti.

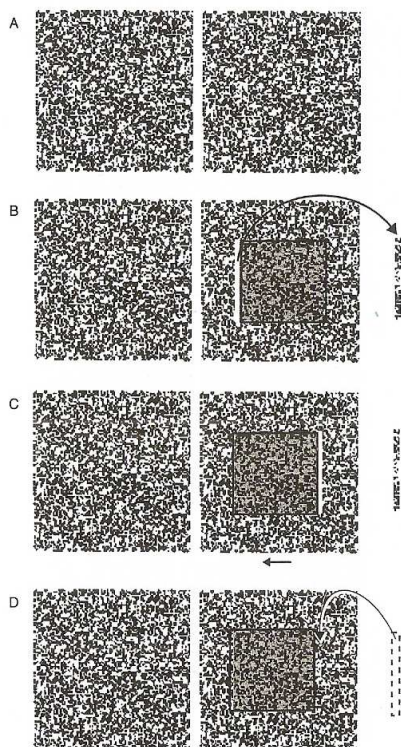


Figura 13: costruzione di uno stereogramma.

Questa credenza fu scalzata dai lavori di Bela Julesz⁽²¹⁾, in cui si affermava che linee e contorni non sono necessari. Coppie di configurazioni casuali di punti disposti in modo che per ogni punto mostrato ad un occhio ve ne fosse uno corrispondente nell'altro erano generati al computer. Creando due stereogrammi con pattern identici e spostando, poi, orizzontalmente alcuni gruppi di punti (Figura 13), questi vanno a fondersi con quelli corrispondenti nel campo dell'altro occhio. Attraverso processi di "free fusion" oppure servendosi di sistemi dissocianti che sfruttano

anaglifi e polaroid, è possibile così rilevare la profondità stereoscopica.

Oggi, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie è possibile ricreare tale meccanismo su display digitali, ottenendo così, la percezione stereoscopica senza la necessità di dipendere da filtri.

I test della stereopsi

I test per la valutazione della stereopsi si distinguono in qualitativi (Test di Lang delle due penne) e quantitativi (Lang I e II, ambientali come Frisby, con anaglifi come il TNO e polarizzati come Titmus Stereotest, Randot Stereotest; Random-Dot).

Un'ulteriore distinzione divide i test eseguiti nello spazio reale (Howard-Dolman; Frisby) da quelli prettamente strumentali (TNO; Titmus; Randot; Random-Dot..)

Da sottolineare che ogni test ha le sue peculiarità che incidono anche sul fine per cui viene usato: misurare la soglia e/o attuare una procedura di screening.

La selezione dei test di cui servirsi avviene in base all'età e alla cooperazione del soggetto.⁽¹⁶⁾

Infatti, le strutture anatomiche da cui dipende la stereopsi sono già formate al momento della nascita, ma non ancora mature.⁽²²⁾ Il nervo ottico completa il suo sviluppo entro i primi due anni di vita, mentre la corteccia visiva si modifica in continuazione dopo la nascita: il numero di sinapsi rimane costante per i primi due mesi di vita, poi raddoppia entro gli otto mesi e si porta ai livelli adulti entro gli 11 anni, periodo nel quale vengono eliminate le connessioni ridondanti. Entro i primi sei mesi, nel NGL avviene la differenziazione della via magno e parvocellulare. Alla nascita le cellule vanno incontro ad accrescimento fino a raggiungere le dimensioni adulte.

A fronte di ciò, la stereopsi è quindi una capacità acquisita⁽⁶⁾ del sistema visivo, la quale inizia il suo sviluppo tra i 3 e i 6 mesi d'età. In generale segue questo decorso, il cui andamento non è lineare:

- 2 mesi: compare la stereopsi grossolana
- 6-7 mesi: stereoacuità rilevabile pari a 1'

- 4-6 anni: stereoacuità rilevabile pari a 80''
- Adolescenti: stereoacuità rilevabile pari a 55''

Di conseguenza si registra un abbassamento della soglia stereoscopica fino ai 20 anni circa, in seguito al costante sviluppo neurologico. Il tutto rimane stabile fino ai 40-45 anni di età circa, poi inizia a declinare a causa di alterazioni nei primi stadi del processo visivo. I risultati dei singoli test devono essere letti in relazione all'età del soggetto esaminato.

CAPITOLO 5: lo studio

Verrà ora descritto lo studio sperimentale su cui si basa la tesi.

Lo scopo

Lo studio sperimentale è volto a confrontare i valori di stereoacuità globale rilevati dalla somministrazione di un test mediante Tablet 3D a barriera di parallasse, con quelli ottenuti attraverso il Randot Stereotest, al fine di valutare se esiste una correlazione tra i risultati in soggetti con parametri refrattivi e binoculari nella norma.

L'aspettativa, da verificare, è quella che i risultati del test stereoscopico somministrato mediante lo schermo di ultima generazione, siano confrontabili e altrettanto validi rispetto a quelli ricavati con il Randot, test ampiamente diffuso nella pratica clinica e qui indicato come gold standard.

Soggetti

Informati a priori della natura dello studio, vi hanno aderito 110 soggetti (69 femmine e 41 maschi) di età compresa tra i 12 e i 79 anni (40 ± 20). Le persone sono state reclutate all'interno della popolazione generale, con l'unico prerequisito di avere un'età pari o superiore a 7 anni. Si assume infatti che,⁽¹⁾ a tale età, un bambino lavori, stereoscopicamente, già ai livelli di un adulto, potendo raggiungere valori di stereoacuità pari a 20"-15".

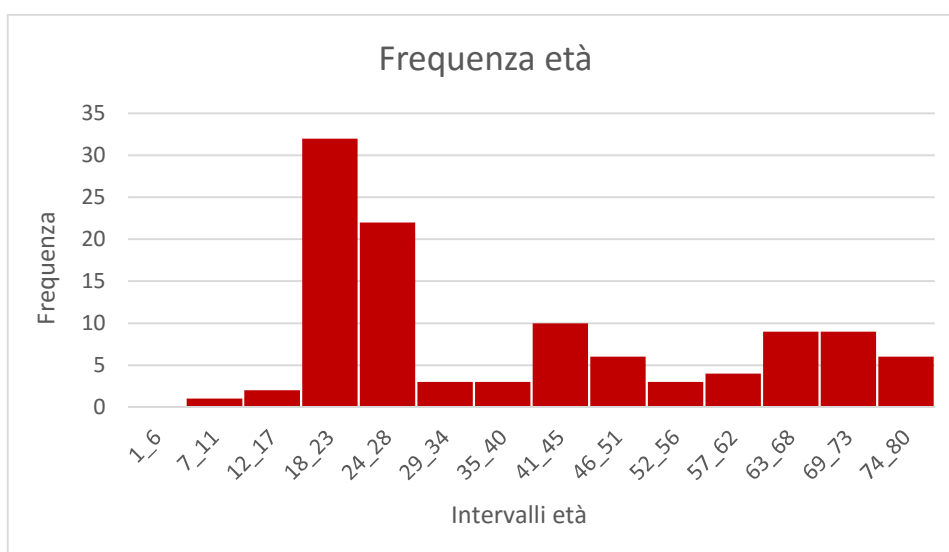


Figura 14: distribuzione delle età dei soggetti che hanno aderito allo studio.

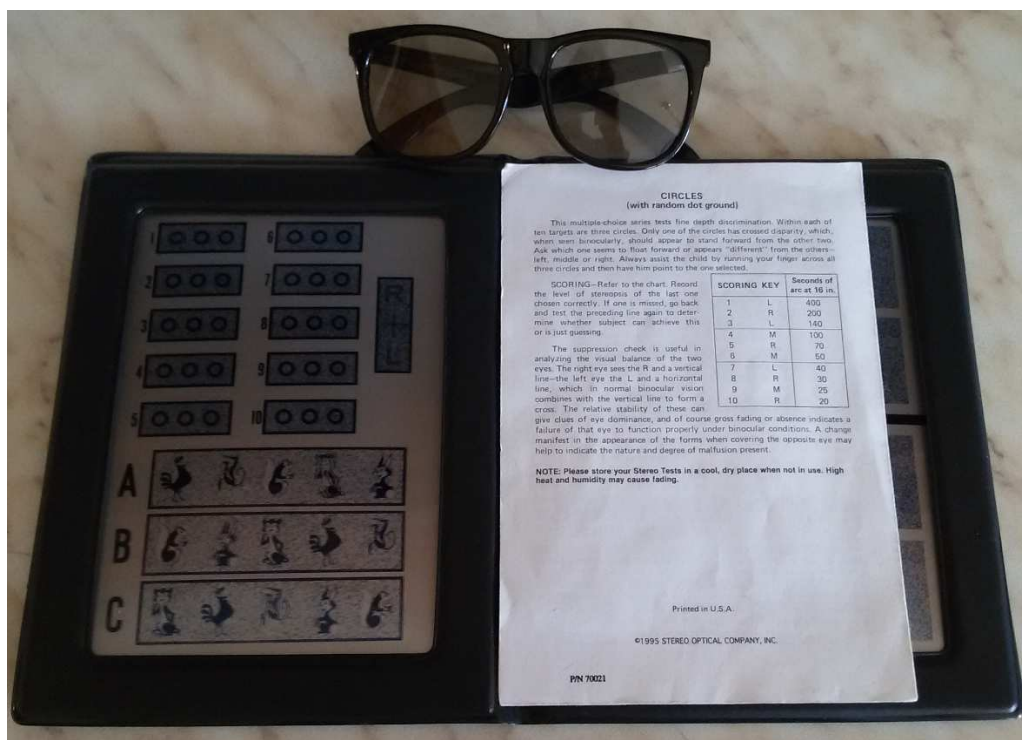
Come dimostra il grafico in figura 14, l'età del campione scelto, presenta una distribuzione abbastanza omogenea.

Tutti i test sono stati effettuati facendo indossare la correzione abituale (occhiali o lenti a contatto) oppure in condizione naturale, qualora al soggetto non fosse stato prescritto, in precedenza, nessun ausilio ottico.

Apparato strumentale

La strumentazione utilizzata ai fini dell'indagine sperimentale è costituita da due test per la rilevazione e la quantificazione della acuità stereoscopica: il Randot test e il Random-dot somministrato su schermo 3D a barriera di parallasse.

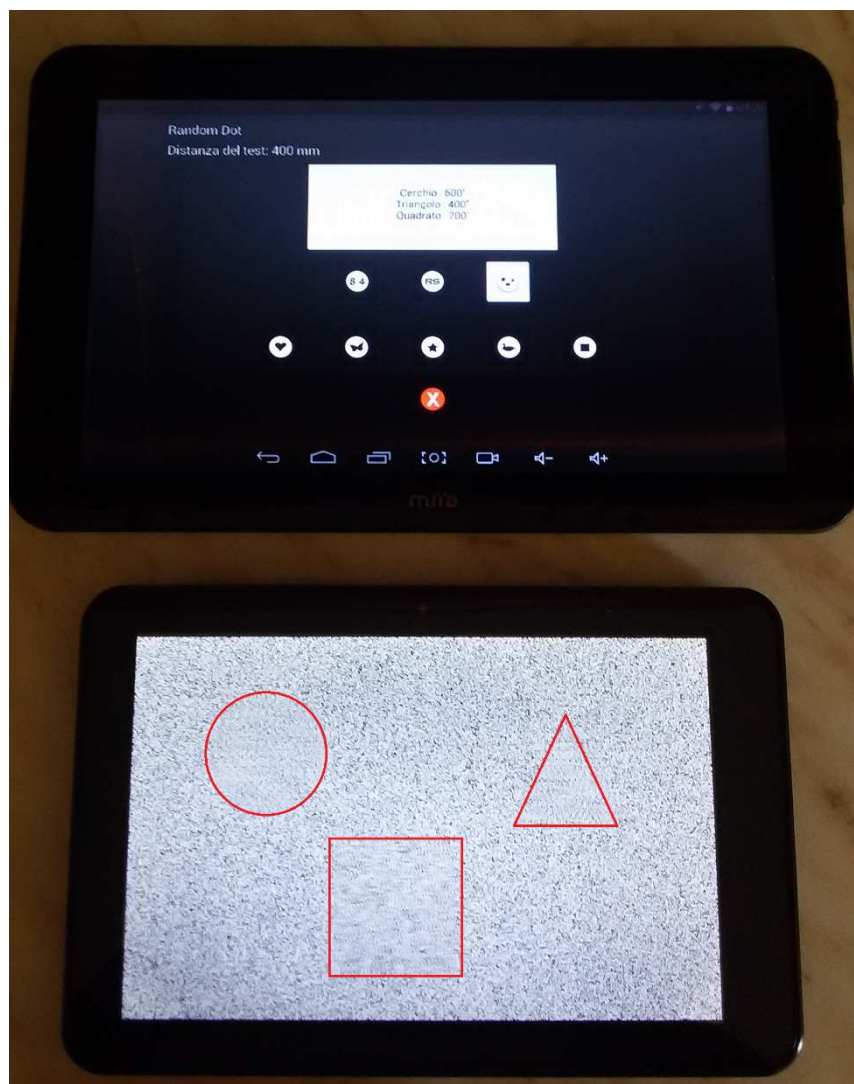
Il Randot si compone di tre tipologie diverse di mire: sei forme geometriche random-dot (500" a 200"), tre file di animaletti (400" a 100") e dieci triplete di cerchi (400" a 20").



È uno dei test più utilizzati per la valutazione della stereopsi a distanza prossimale (0,40 m), ma non è l'unico (Wirth; TNO). Tuttavia, è stato scelto perché presenta delle caratteristiche che permettono di attuare un confronto con il test dello schermo. In primis, a differenza del Wirth, è un test semi-contornato, ovvero le mire giacciono su uno sfondo a punti random, richiamando così parzialmente gli stereogrammi randomizzati.

Ai fini del test sono state utilizzate solo le triplette di cerchi. Inoltre, raggiunge un valore di fondo scala significativo (20") a dispetto dei 40" del Wirth. Infine, è stato preferito al TNO perché quest'ultimo, pur essendo un test globale molto valido in cui non c'è possibilità di imbrogliare⁽⁵⁾, è per sua natura un anaglifo, le cui mire devono essere osservate attraverso filtri rosso-verdi, i quali possono alterare il livello di contrasto percepito. I vettogrammi del Randot, sono invece osservati attraverso l'utilizzo di filtri polarizzati, che influiscono in maniera ridotta sulla visione. Lo svantaggio di tale test sta nel fatto che i cerchi rimangono parzialmente visibili monocolarmente, nonostante la presenza del background randomizzato, e questo può introdurre un bias nelle risposte dell'esaminato.⁽⁵⁾

L'altro test utilizzato per il fine ultimo dello studio è un Random-Dot su schermo 3D. Le mire sono costituite da otto disegni di stereoacuità variabile tra 600" e 30".



A differenza di quelle del Randot, sia l'oggetto target che lo sfondo sono formati da punti randomizzati, in modo tale da impedire il riconoscimento dell'oggetto attraverso indizi monoculari.⁽²³⁾

Se da un lato la tipologia di test è nota già da tempo grazie ai lavori di Bela Julesz, è la modalità di visualizzazione che risulta essere del tutto innovativa. Infatti, a differenza degli altri test in commercio, viene utilizzata una tecnologia che permette la visione stereoscopica senza l'ausilio di filtri di alcuna sorta.

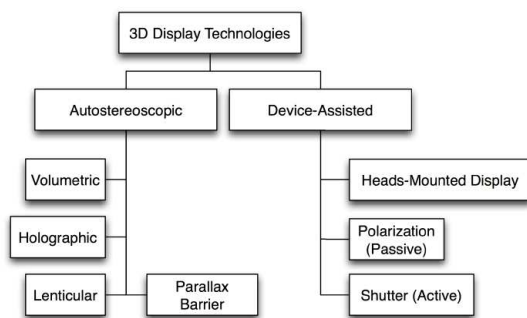


Figura 15: tecnologia 3D.

Come si può notare dalla figura 15 esistono diversi tipi di display che permettono una visione tridimensionale. Quello utilizzato appartiene alla classe dei display autostereoscopici a barriera di parallasse.

Sviluppato dalla RV2-RealVision Kiwie (Milano, Italia), rappresenta il tentativo di creare anche a livello strumentale, una visione stereoscopica che sia la più reale possibile. Infatti, essendo un autostereogramma,⁽¹²⁾ non necessita né di filtri polarizzati né anaglifici che possono inficiare la percezione stereoscopica e alterare la qualità della fusione che risulta, quindi, differente da quella di cui si fa esperienza nel mondo reale.⁽²³⁾

Il meccanismo di base prevede un sistema di display multivista. Questo si ottiene ponendo di fronte allo schermo, un dispositivo ottico come una barriera di parallasse,⁽²³⁾ il cui scopo è fornire diverse immagini visualizzabili da diversi punti di vista. Il sistema più utilizzato, presenta una barriera di parallasse a quattro punti

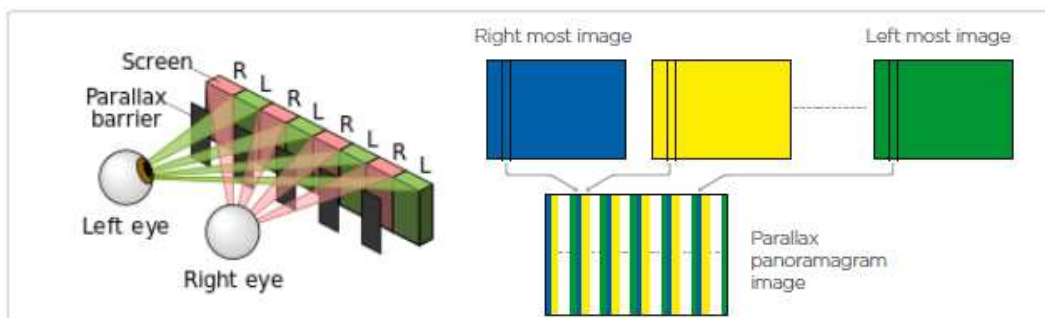


Figura 16: meccanismo di funzionamento della barriera di parallasse.

di vista. È questo il meccanismo che permette di avere una percezione della profondità senza l'utilizzo di filtri.

Altra componente fondamentale è la costruzione della mira. A differenza degli stereogrammi dei normali test random-dot, in cui la percezione stereoscopica viene raggiunta semplicemente attraverso uno shift

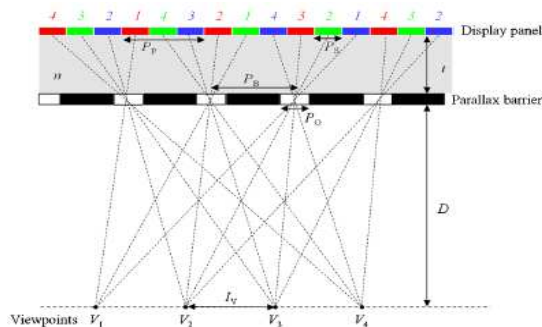


Figura 17: multigramma random-dot in schermo multivista.

laterale del pattern, nel display 3D il concetto si complica e ci si riferisce alla mira con il nome di multigramma. Il multigramma random-dot è generato grazie ad un processo di acquisizione in un display multivista. Si compone di una figura e di uno sfondo entrambi random-dot. Il target formato da punti, accoppiati con tutti gli altri punti random, viene percepito centralmente, mentre lo sfondo riempie il resto dell'immagine vista con un pattern di punti spostati lateralmente (Figura 17). Infine, i pixel devono essere sufficientemente piccoli da permettere di generare disparità angolari anche minime. In un sistema a parallasse la risoluzione diminuisce a seconda del numero di punti di vista presenti.

I costruttori⁽²⁴⁾ riportano che il principale vantaggio di non dover utilizzare filtri consiste nel fatto che la pupilla non si dilata e di conseguenza non viene modificato il match tra accomodazione e convergenza. La misura della acuità stereoscopica risulta quindi più reale e accurata. Tuttavia, a proposito, non sono stati trovati supporti scientifici che accertino quanto affermato.

Il test stereoscopico randomizzato di cui si è appena discusso, viene somministrato tramite un tablet tenuto in mano dell'esaminato e comandato da un controller gestito dall'esaminatore. Il programma di cui lo stereotest fa parte, contiene numerosi altri test per la valutazione dell'AV, del bilanciamento, delle forie, della visione dei colori e molti altri ancora.⁽²⁵⁾

Inoltre, a scopo di esame preliminare, ci si è serviti di:

- questionario di anamnesi;
- test FrACT al fine di rilevare l'acuità visiva a distanza;

- occlusore e barre di prismi di Berens per la quantificazione di eventuali eteroforie o eterotropie;
- ottotipo prossimale per l'acuità visiva;
- filtri polarizzati per il bilanciamento a distanza;
- un luxmetro (tramite applicazione per smartphone) per il rilevamento dell'illuminamento in condizioni di test.

La progettazione dello studio

Lo studio si articola in tre fasi consecutive tra di loro, ma concettualmente distinte.

Nella prima viene somministrato il questionario anamnestico, il cui scopo è sondare la qualità delle prestazioni visive prossimali a 0,40 m al fine di rilevare la presenza di disturbi o di discomfort che possono essere eventualmente collegati ad una capacità stereoscopica ridotta, capacità che è predominante per lo svolgimento di tutte le attività all'interno del range di visione prossimale.⁽¹⁷⁾

Le risposte alle domande sono a scelta forzata tra cinque possibilità.

Successivamente ogni soggetto è sottoposto ad una batteria di test al fine di valutare la refrazione, il bilanciamento ed il sistema forico, sia alla distanza di 4 m che di 0,40 m. Lo scopo è quello di evidenziare la presenza di eventuali anomalie in tali ambiti di indagine, per selezionare, durante l'elaborazione dei dati, i risultati di stereoacuità dei soggetti "normali".⁽²⁶⁾

Solo i dati di questi ultimi sono stati utilizzati ai fini dello studio.

Infatti, è noto che, alla distanza prossimale, una debole acuità visiva, la presenza di eteroforie, di disparità di fissazione e la difficoltà nella integrazione delle immagini binoculari sono cause di una ridotta stereoacuità.⁽⁶⁾ Di conseguenza, i dati di stereoacuità ricavati da tali soggetti saranno meno attendibili o a volte assenti e quindi non utili per lo scopo prefissato.

A tale proposito, sono stati scelti i seguenti criteri di inclusione:

- acuità visiva almeno pari a 0,10 LogMAR (equivalente a 8/10 nella scala decimale);
- differenza nel bilanciamento prossimale non superiore alle 0.25D;

- forie secondo le norme riportate da Scheiman e Wick⁽²⁷⁾ prese però con un livello di confidenza al 95%, e corrispondenti quindi al range [-2;+2] Δ da lontano e [-3; +9] Δ da vicino, dove il segno negativo indica una esoforia e quello positivo una exoforia;
- assenza di tropie.

Infine, l'ultimo step consiste nella somministrazione, uno di seguito all'altro, dei due test di stereopsi in ordine completamente casuale. Di questi test veniva registrato il valore soglia, ovvero l'ultima risposta corretta prima di due errate consecutive.⁽¹⁷⁾

Procedura

I test sono stati svolti in condizione di illuminazione ambientale. In aggiunta, per l'esecuzione dei test prossimali, si è usato un faretto posto alle spalle del soggetto e illuminante il test per fornire un miglior contrasto.⁽²⁶⁾ L'illuminamento rilevato per i test prossimali è pari a 110 lux. Le misurazioni sono state svolte sempre e solo da un unico operatore, in parte presso la sede di tirocinio e in parte presso i laboratori universitari. Tutte le condizioni (distanza, illuminamento) sono state rispettate e mantenute inalterate per ogni misurazione.

Pre-studio

A fini statistici, è stato condotto uno studio preliminare per verificare se la somministrazione, e quindi la visualizzazione, per primo di uno dei due test di stereopsi influisse nei risultati del secondo.

Sono stati quindi raccolti i dati di 20 soggetti. A dieci di questi è stato somministrato prima il Randot e poi il test dello schermo; per gli altri dieci l'ordine di somministrazione è stato invertito. Nel breve intervallo di tempo necessario per il cambio tecnico tra un test e l'altro, il soggetto aveva la libertà di dirigere lo sguardo in qualunque direzione volesse.

L'analisi statistica è stata condotta ricavando il plot di frequenza dei risultati di entrambi i test.

Come dimostra l'istogramma in figura 18, l'ordine di somministrazione dei due test non incide sul risultato di stereoacuità apprezzabile dal soggetto, in quanto i

risultati ottenuti con entrambi gli ordini di somministrazione sono sovrapponibili tra loro, mostrando per di più un picco alle basse disparità angolari.

Si ricordi che tanto minore è il valore algebrico della stereoacuità, tanto migliore è la capacità di percezione stereoscopica.

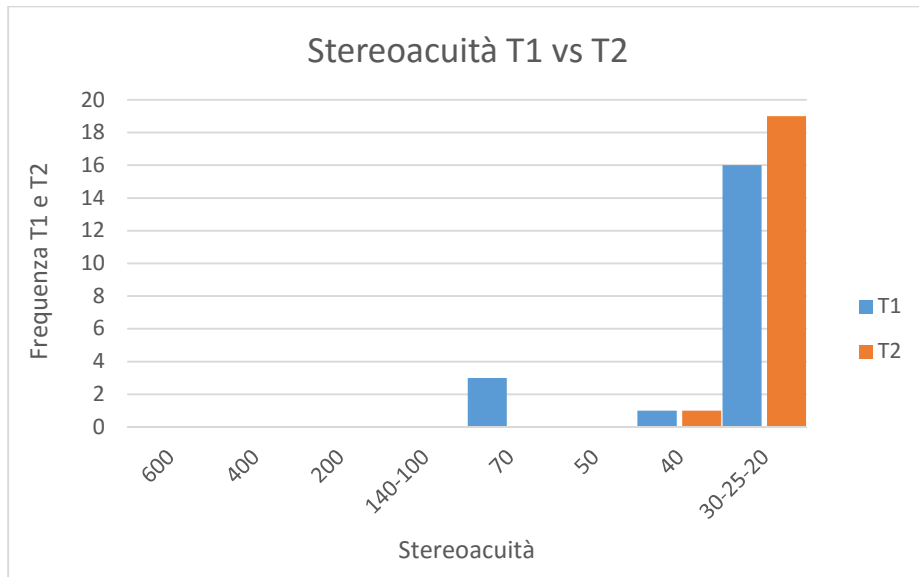


Figura 18: istogramma di confronto stereoacuità del pre-test.

In questa fase preliminare non si è andati ad escludere i soggetti con eventuali anomalie.

In conclusione, non essendo incisivo, l'ordine di somministrazione è stato scelto in modo casuale.

Lo studio

Prima dell'esecuzione dei test, ogni soggetto è stato chiamato a compilare il questionario composto da 25 quesiti con 5 possibilità di risposta (mai, raramente, alcune volte, spesso, sempre), sulla base della frequenza con la quale il fenomeno descritto nella domanda si presenta. (Appendice A)

Successivamente, ha avuto inizio l'indagine strumentale seguendo un protocollo di lavoro appositamente creato. (Appendice B)

Gli unici dati generali, facoltativi, richiesti ai soggetti sono stati l'età, il sesso e la correzione ottica, se prescritta, necessaria per lo svolgimento dei test. Lo scopo, non è eseguire una analisi visiva utile all'identificazione della migliore correzione necessaria a ciascun individuo, ma andare a comprendere, in maniera semplice,

qual è la qualità della sua visione in condizioni abituali, sia refrattive che binoculari. Il tutto per selezionare, ai fini del test, i soggetti che rispettano i parametri assunti come norma, oltre che per osservare una eventuale correlazione tra acuità stereoscopiche basse e tali anomalie.

L'ordine di esecuzione è stato il seguente:

- a. Acuità visiva (@ 4m): rilevata monocolarmente (Figura 19) tramite il FrACT



(versione 3.8.2), procedura automatica computerizzata che garantisce una misura accurata, veloce e priva di bias.⁽²⁸⁾ Il programma è stato appositamente calibrato per la distanza di 4m.

Figura 19: rilevazione monoculare AV.

La mira di risoluzione di cui ci si è serviti è non solo la più comune ma è anche di riferimento per le norme di standardizzazione (DIN e ISO)⁽⁶⁾: si tratta dalla C di Landolt (Figura 20). Come da convenzione, viene costruita dentro una griglia 5x5 dove l'unità u , misurata in minuti d'arco, definisce il valore dell'AV decimale. Se l'AV è 10/10, u sarà uguale a 1 minuto d'arco. All'esaminato viene richiesto di indicare in quale direzione si trova l'apertura della C (quattro o otto direzioni).

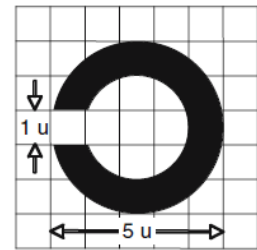


Figura 20: C di Landolt usata nel FrACT e la sua griglia di costruzione.

Il valore di soglia viene stimato sulla base del best PEST (best Parameter Estimation by Sequential Testing), metodo psicofisico in cui la funzione psicometrica utilizzata ha una pendenza costante su una scala di acuità logaritmica. Il metodo sul quale si basa prevede che lo step (la dimensione del target) iniziale sia grande (bassa AV) e poi diminuisca man mano che si

procede. In particolare, la velocità con cui ciò avviene è elevata e quindi capita che i soggetti lamentino di non riuscire a vedere l'apertura della C.⁽²⁸⁾

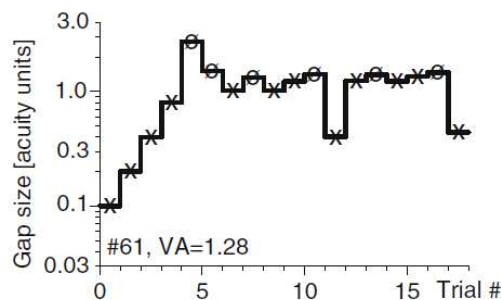


Figura 21: variazioni dimensioni stimolo durante il test.

Ad ogni cambiamento le dimensioni dello stimolo vengono dimezzate, fino a quando si raggiunge una misura minima dove la dimensione dello step rimane costante: si è raggiunto il valore di soglia (metodo psicofisico adattivo) (Figura 21). Si è scelto di far terminare la misurazione dopo un numero di trials pari a 18, dove il sesto trial e i suoi multipli erano di riposo, ovvero avevano AV inferiore rispetto a quella di soglia. Tuttavia, si ritiene che per avere dei risultati maggiormente affidabili, sarebbe più appropriato eseguire sezioni da 30 trials. ⁽²⁹⁾ Per lo scopo all'interno del test e per motivi di praticità, si è ritenuto che 18 trials fossero sufficienti.

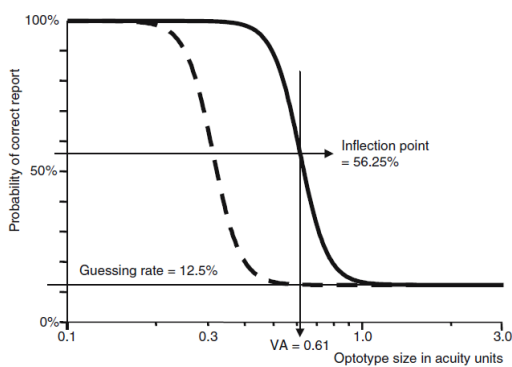


Figura 22: curva psicometrica per la misurazione della soglia dell'AV.

Il metodo di risposta è a scelta forzata e, nel caso specifico, tra otto alternative (otto direzioni di apertura). Il soggetto, anche nel caso in cui non riesca a risolvere la mira, deve comunque scegliere una risposta tra le otto possibili. Quindi la probabilità (caso) di avere

una risposta corretta è del 12.5%, mentre, di conseguenza, il valore di soglia è quello che produce il 56.25% di risposte corrette durante la prova. Il valore di soglia e le dimensioni corrispondenti dell'ottotipo sono descritte dalla funzione psicometrica (Figura 22).

I risultati sono forniti il LogMAR e frazione decimale.

- b. Bilanciamento (@ 4m): attraverso l'utilizzo di filtri polarizzati e un annebbiamento di +0.75D binoculare rispetto alla correzione abituale o alla visione naturale, si è cercato di capire se il sistema visivo fosse bilanciato. In realtà, i risultati ottenuti hanno evidenziato che l'informazione ottenuta non era utile poiché imprecisa, in quanto molti soggetti avevano correzioni non aggiornate o riferivano problematiche di natura patologica (ambliopia, glaucoma, cheratocono) tali per cui era impossibile valutare il bilanciamento. Nell'analisi dei dati quindi, tale aspetto non è stato considerato, ma ha probabilmente causato uno spettro di diversi valori di stereopsi, utili per il confronto dei due test.

- c. Cover test (@ 4m): test più importante per la visione binoculare ⁽¹⁴⁾ è stato svolto per evidenziare la presenza di tropie (cover-uncover) e di forie (alternato). Una volta accertata l'assenza di tropie ed identificata la tipologia della foria, grazie alla direzione del movimento di recupero dell'occhio che viene scoperto, ne è stato quantificato l'ammontare attraverso l'utilizzo delle stecche di prismi di Berens (Figura 23).



Figura 23: valutazione entità forie in distanza.



Figura 23 bis.

Il procedimento prevede di anteporre il prisma davanti ad un occhio con la base rivolta nella giusta direzione e di eseguire un cover test alternato fino a quando non si nota più nessun movimento apparente dell'occhio o fino a quando non si percepisce un movimento nella direzione opposta.

L'unico svantaggio è costituito dal fatto che tale test presenta una certa tolleranza, di circa $2-3\Delta$, legata all'abilità dell'esaminatore.⁽⁶⁾

Il target utilizzato era una lettera isolata di dimensioni pari all'AV dell'occhio con minore visus; se l'AV ≥ 1 LogMAR, si usava una luce puntiforme.

- d. AV prossimale (@ 0,40 m): misurata monocularmente, è il dato di acuità più significativo ai fini della stereopsi. L'intento iniziale era di rilevarla con il FrACT, tuttavia, come riporta Michael Bach, ⁽²⁹⁾ la massima e la minima AV riscontrabili sono dipendenti dalle dimensioni dello schermo del pc, dalle dimensioni dei pixel e dalla distanza di osservazione. Nel caso specifico, le dimensioni dei pixel rapportate alla distanza di 0,40m permettevano di raggiungere una AV massima di appena 0.40 LogMar (4/10), valore insufficiente per lo studio. Si è deciso quindi di usare l'ottotipo formato dalle C di Landolt (Figura 24) presente nella batteria di

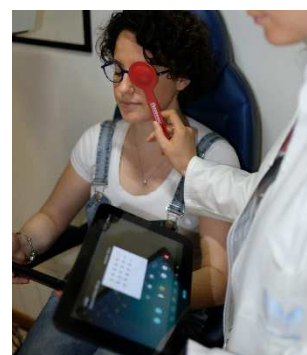


Figura 24: rilevazione AV prossimale.

test della RealVision. I risultati sono stati riportati in LogMAR e in scala decimale.

- e. Bilanciamento (0,40 m): servendosi di un altro test disponibile nel programma installato nel tablet è stato possibile valutare il bilanciamento prossimale senza l'utilizzo di filtri e con entrambi gli occhi simultaneamente aperti, grazie al meccanismo di dissociazione visto in precedenza (Figura 25).



Figura 25: test bilanciamento visto nel controller.

Su sfondo grigio appaiono due pallini neri, uno visto dall'occhio destro e uno dall'occhio sinistro, dei quali il soggetto deve bilanciare l'intensità di colore. Una volta bilanciati, si chiede di leggere le tre file di lettere (Sloan), dell'ottotipo sottostante, con AV crescente (0.32 a 0.80 decimale), di cui la riga superiore è vista solo dall'occhio destro, quella inferiore solo dal sinistro, mentre quella intermedia da entrambi. In questo modo si rileva il bilanciamento nelle condizioni più naturali possibili, simulando l'ambiente reale.

- f. Cover test (@ 0,40 m): utilizzando una mira di 0,10 LogMAR tenuta in mano dal soggetto, si è seguita la stessa procedura vista per il cover test in distanza e allo stesso scopo (Figura 26).



Figura 26: esecuzione cover test prossimale.

dal soggetto, si è seguita la stessa procedura vista per il cover test in distanza e allo stesso scopo (Figura 26). L'unica variazione da tenere in considerazione è il diverso range di tolleranza dovuto alla differente distanza di test.

- g. Test di stereopsi (@ 0,40m): indicati in fase sperimentale con T_1 e T_2 rispettivamente, il Randot e il Test dello schermo a barriera di parallasse, sono stati somministrati in ordine casuale sulla base dei risultati dello studio preliminare. In particolare, per garantire alternanza ed evitare

eventuali bias, si è deciso di somministrarli perpetuando l'alternanza nell'ordine, vista nel pre-studio.

Obbligatorio l'utilizzo della correzione prossimale (se in uso).

Per il primo test era richiesto al soggetto di indossare i filtri polaroid, con inclinazioni ortogonali tra i due occhi (45° e 135°), necessari per la visualizzazione dei vettogrammi e di impugnare il test con inclinazione parallela al piano facciale e mantenerlo alla distanza di 40 cm, distanza verificata tramite l'utilizzo di un metro (Figura 27). Come per ogni test



Figura 27: test 1 a 0,40m

prossimale, in aggiunta all'illuminazione della stanza si è usato anche un faretto posto sopra le spalle del soggetto.

Si è proceduto chiedendo, per ognuna delle dieci triplette, quale dei tre cerchi fosse quello che presentava la particolarità di uscire dal foglio. Il risultato registrato, se diverso dal fondo scala, è quello dell'ultima risposta corretta prima di due errate consecutive.⁽⁵⁾



Figura 28: test 2 a 0,40m

La distanza di somministrazione del test T_2 è sempre di 0,40m sulla base delle indicazioni fornite dalla casa costruttrice (Figura 28). Il soggetto è chiamato a tenere lo schermo a tale distanza, con inclinazione parallela al piano facciale. Anche in tale caso si deve verificare che non venga eseguito il tilting laterale della testa che potrebbe compromettere i risultati del test.

A differenza del test precedente, però, non si usano filtri di nessun genere e non si esegue un compito a scelta forzata tra tre opzioni ma si chiede di riportare se è presente o meno un oggetto che fuoriesce rispetto allo sfondo e, in caso affermativo, di identificarne la forma. Infatti, ad ogni step di stereoacuità corrisponde un disegno diverso (cerchio, triangolo, quadrato, cuore, stella, farfalla, oca, quadrato).

Il valore della più piccola disparità correttamente rilevata è registrato secondo i criteri utilizzati anche per il Randot. Unica differenza è il valore massimo di acuità stereoscopica raggiungibile: 20" per T_1 e 30" per T_2 .

Risultati

Come già accennato, a nessun soggetto sono stati chiesti dati di salute generale o oculare. Infatti, per creare la suddivisione in gruppi che ora si vedrà, non sono necessari altri criteri se non quelli che riguardano l'ottica e le capacità accomodativa e di vergenza dell'individuo. Questo perché, come è noto e come si è riscontrato sulla base di quanto riferito di propria iniziativa dai soggetti esaminati, le patologie oculari come cheratocono, ambliopia, strabismo, glaucoma, si traducono in un calo di visus o in problemi di allineamento oculare che di per sé sono già sufficienti per lo scopo dello studio. L'obiettivo, infatti, non è indagare le cause di un'acuità visiva compromessa o di una foria elevata, ma bensì prenderle come dato di fatto e analizzare quali sono le ripercussioni che causano a livello di acuità stereoscopica.

Nella fase di elaborazione dei dati, i soggetti sono stati suddivisi in due gruppi: i soggetti normali e quelli anormali sulla base dei risultati dei pre-test. In ciascuno dei due gruppi sono state ricavate delle sottocategorie al fine di analizzare nel dettaglio alcune situazioni peculiari:

A. Soggetti "normali" divisi in:

- A1: soggetti normali non presbiti (con età inferiore ai 40 anni);
- A2: soggetti normali presbiti (età uguale o superiore a 40 anni).

B. Soggetti con anomalie prossimali

- B1: soggetti con acuità visiva superiore a 0,10 LogMAR;
- B2: soggetti con forie di entità superiori ai valori di norma presi con tolleranza di 2 d.s., ovvero eccedenti il range $[-3; +9]\Delta$;⁽²⁷⁾
- B3: soggetti con tropia rilevata al Cover Test cover-uncover.

C. Soggetti con anomalie nel bilanciamento prossimale.

L'aver usato come discriminante solo i dati rilevati in visione prossimale, deriva dal fatto che è a questa distanza che la stereopsi è maggiormente funzionale.

GRUPPO A

Dei 110 soggetti di cui sono stati raccolti i dati, solo 75 sono stati inclusi all'interno del gruppo A.

L'analisi statistica è stata svolta studiando la frequenza di ciascun livello di stereoacuità registrato all'interno del gruppo. Si sono quindi ottenuti i plot di frequenza relativi a T_1 e T_2 che sono stati confrontati tra loro. Nel fare tale operazione si è dovuto tener conto delle diversità negli step di stereoacuità dei due test. Dai dieci del T_1 e dagli otto del T_2 ne sono stati ricavati otto che rispettano le caratteristiche di entrambi al fine di rendere possibile il confronto. Per esempio, i tre step 30", 25" e 20" del Randot sono stati fatti confluire in un'unica voce pari a 30" per rispettare la minore sensibilità propria del T_2 .

Ne sono esplicative le seguenti tabelle:

Tabella II: Frequenze della stereoacuità nei due test per il GRUPPO A

T1		T2	
Stereopsi	Frequenze	Stereopsi	Frequenze
400	0	600	0
200	0	400	0
140	0	200	0
100	0	100	0
70	3	70	0
50	0	50	0
40	3	40	1
30	10	30	74
25	16		
20	43		

Da cui si ricava:

Tabella III: intervalli di frequenze unificati rispettando le caratteristiche di entrambi i test.

T1		T2	
Stereopsi	Frequenze	Stereopsi	Frequenze
600	0	600	0
400	0	400	0
200	0	200	0
140-100	0	100	0
70	3	70	0
50	0	50	0
40	3	40	1
30-25-20	69	30	74

È a partire dai dati di frequenza di quest'ultima che sono stati ricavati i relativi istogrammi di confronto tra i due test al fine di evidenziare se fosse presente o meno, la compatibilità tra i risultati. Un modo per dimostrare l'esistenza o meno, della compatibilità, è verificare se i valori sono sovrapponibili tra loro. In caso affermativo risulta che i due test sono ugualmente efficaci.

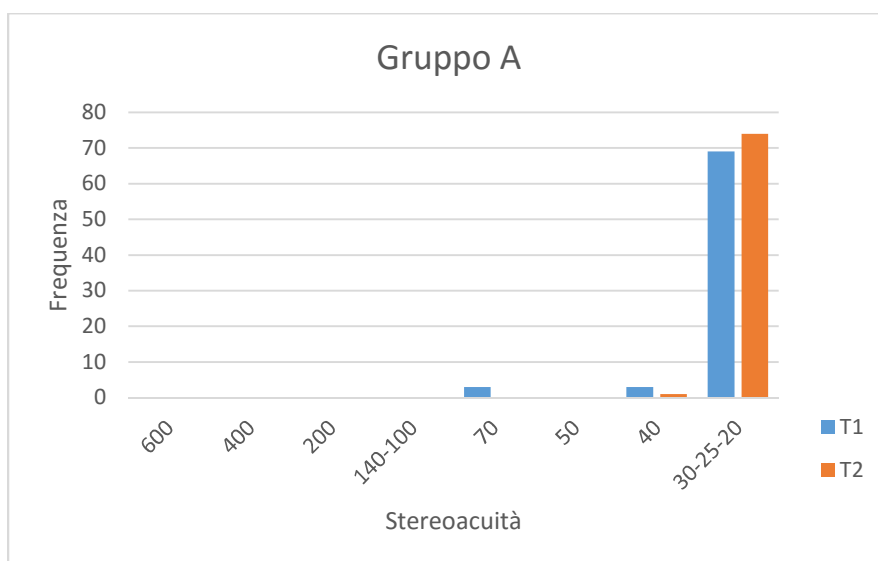


Figura 29: distribuzioni di frequenza gruppo A.

Come si evince dalla rappresentazione grafica delle distribuzioni (Figura 29), i soggetti che presentano refrazione e sistema visivo binoculare nella norma ottengono ottimi risultati nei test stereoscopici, per una compatibilità tra i due test pari al 92%. Solo 3 soggetti non ottengono acuità stereoscopica superiore ai 70" al Randot, mentre anche le frequenze relative ai 40" sono tra di loro sovrapponibili.

SOTTOGRUPPI A1 E A2

Analizzando il sottogruppo A1 si nota che solo 3 soggetti non raggiungono il valore di fondo scala, ma ottengono comunque un risultato di stereoacuità estremamente soddisfacente e nella norma (Figura 30).

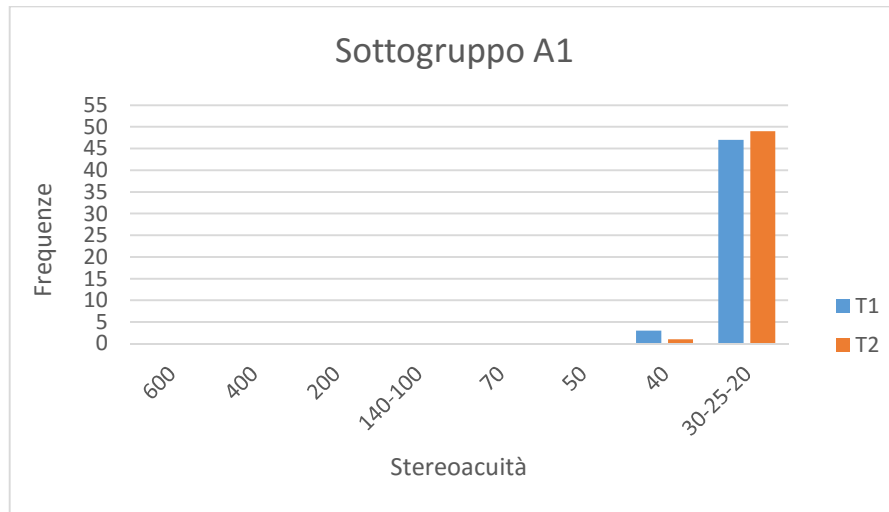


Figura 30: distribuzione frequenza sottogruppo A1

Il sottogruppo A2 (Figura 31) riconferma i risultati di compatibilità, fatta eccezione per tre soggetti la cui massima acuità con il test T_1 è pari a 70". Da un punto di vista ottico, tale discrepanza non trova spiegazione. Si può ipotizzare che la causa derivi da problemi oculari e neuronali, ma si sarebbero dovute riscontrare anomalie anche in T_2 . Quindi, molto più probabilmente, si tratta di bias nella somministrazione (come ad esempio una non corretta inclinazione) del test.

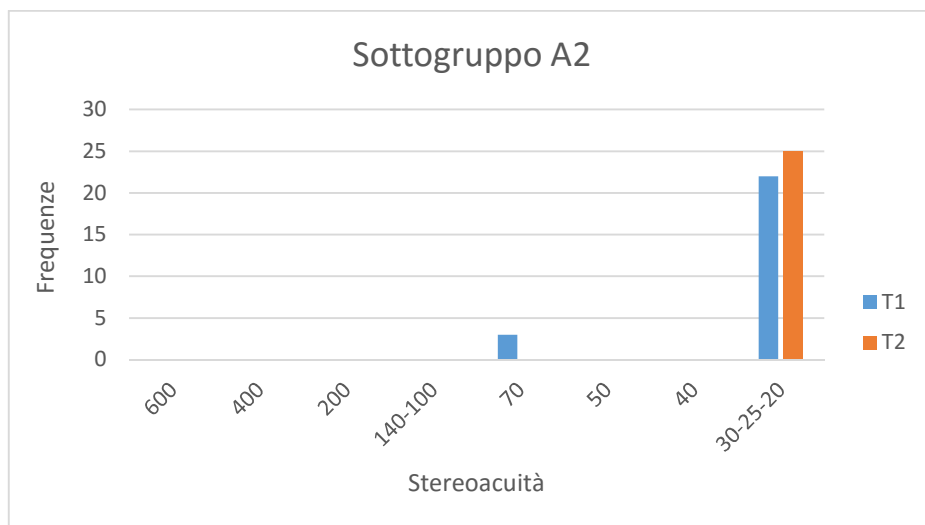


Figura 31: distribuzione frequenza sottogruppo A2.

Dopo aver concluso l'analisi dei dati dei soggetti normali e aver verificato che esiste compatibilità, si è deciso di estendere l'analisi anche ai dati del gruppo di soggetti classificati come "anomali" per capire se un dato errore provoca una risposta univoca a livello di stereocucità.

GRUPPO B

Nel SOTTOGRUPPO B1, composto da 18 persone, sono stati raggruppati coloro i quali presentano AV prossimale ridotta. Ancora una volta per la maggior parte dei soggetti sussiste la compatibilità tra i due test e si evidenzia un maggior picco per valori ridotti di disparità (Figura 32):

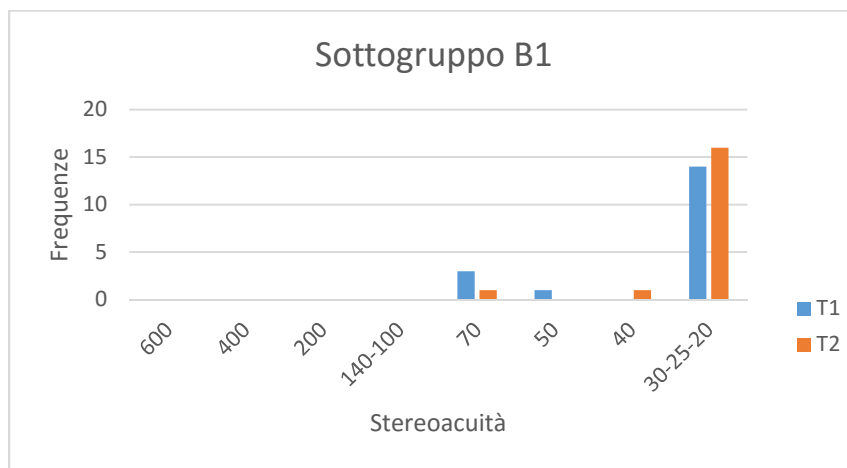


Figura 32: distribuzione frequenze sottogruppo B1.

Solo alcuni soggetti presentano difficoltà con uno dei due (Figura 33):

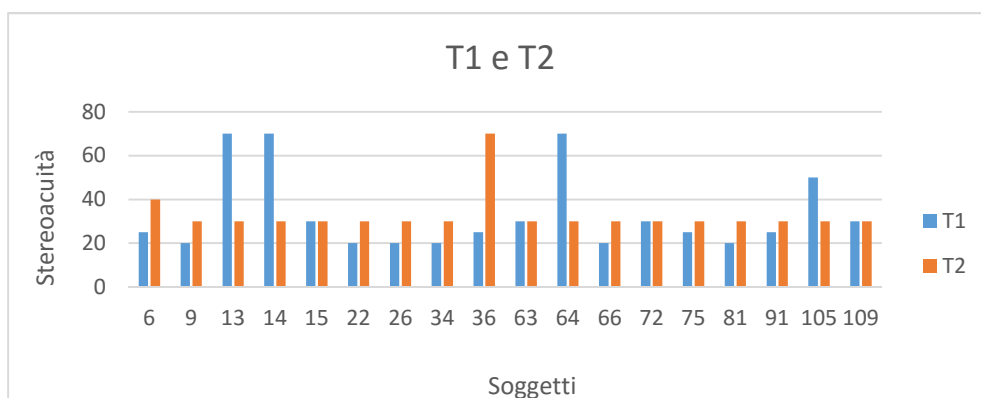


Figura 33: valori di stereocucità a confronto nei singoli soggetti; sottogruppo B1.

Per i soggetti 13, 14 e 64 viene registrata una riduzione in AV più marcata (dai 0,46 ai 0,20 LogMAR) mentre i soggetti 6 e 36, che evidenziano maggiori difficoltà con T_2 , riferiscono patologie oculari.

Nel SOTTOGRUPPO B2, formato da 10 soggetti in condizione forica anomala, i risultati sono meno omogenei (Figura 34).

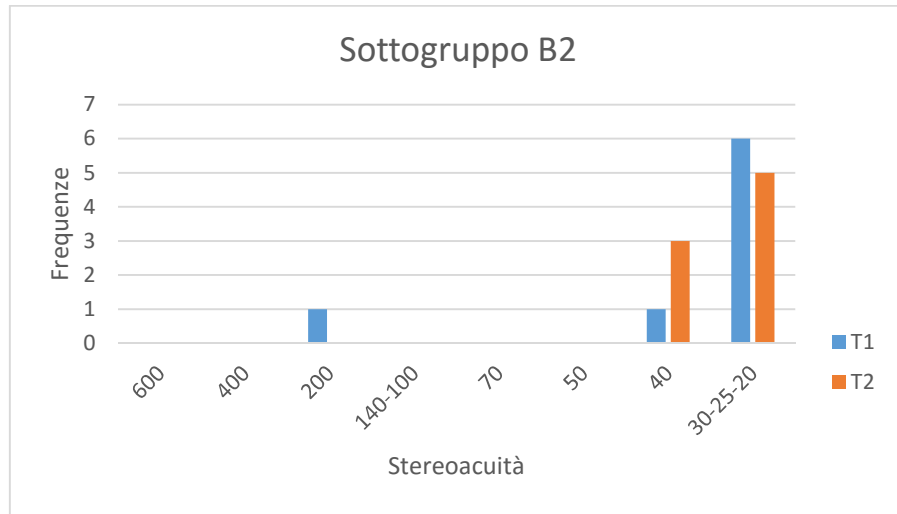


Figura 34: distribuzione frequenze sottogruppo B2.

Esaminando il grafico sottostante (Figura 35), si evince che, da un punto di vista clinico, due dei soggetti (87 e 96) non presentano percezione stereoscopica. È noto che soggetti presbiti con la loro correzione abituale presentino frequente soppressione centrale.⁽³⁰⁾ Per il numero 96 tale considerazione non vale in quanto riferisce cheratocono bilaterale e ambliopia.

Inoltre, il soggetto 21 raggiunge solo i 200" al Randot e presenta esoforia sia prossimale che a distanza. Al test T_2 raggiunge i 40".

Infine, il soggetto 99 pur presentando 13 Δ di exoforia da lontano e 30 Δ di exoforia prossimale, possiede valori di stereovisione nella norma.

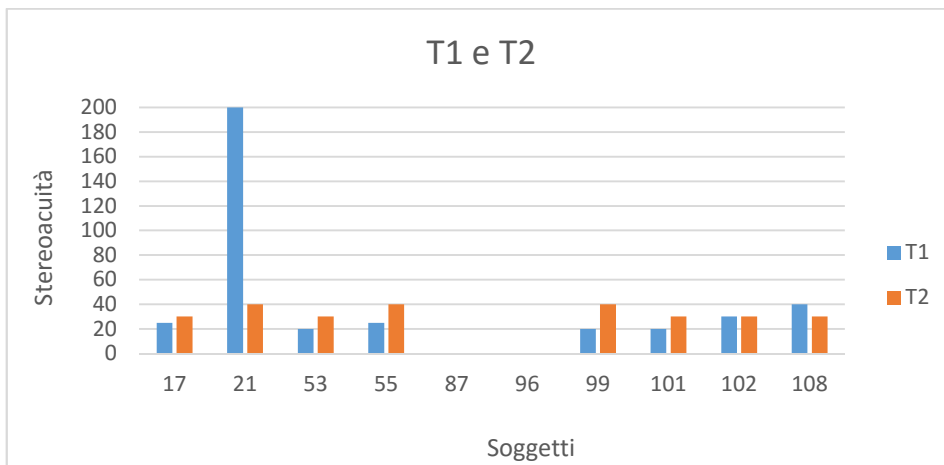


Figura 35: valori di stereovisione a confronto nei singoli soggetti; sottogruppo B2.

Nel SOTTOGRUPPO B3, composto dai soggetti, in numero pari a 2, per cui è stata rilevata una tropia al cover test, non è stato possibile raccogliere i dati di stereoacuità, come ci si aspettava.⁽¹⁶⁾

GRUPPO C

L'ultimo gruppo di indagine è costituito da quei soggetti, in numero pari a 5, che presentano uno sbilanciamento in visione prossimale (Figura 36).

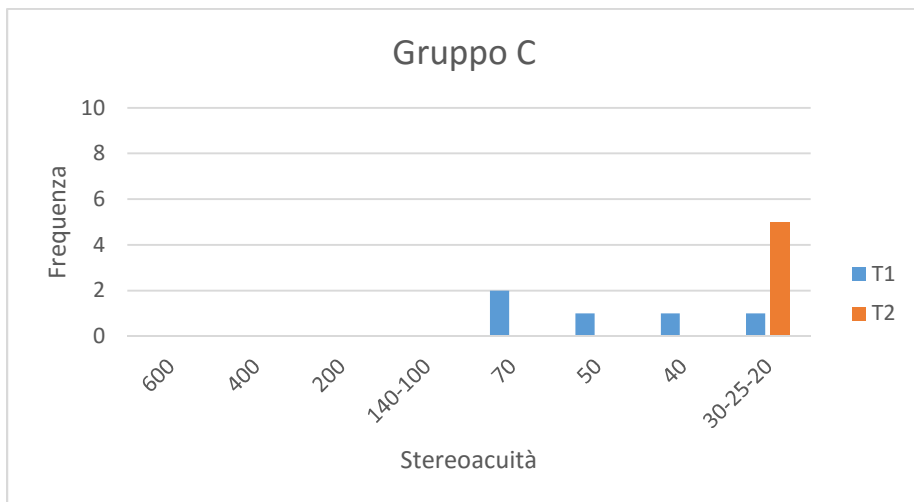


Figura 36: distribuzione di frequenza gruppo C.

Come si può notare (Figura 37), i valori di stereoacuità raggiunti sono molto diversi da soggetto a soggetto in T_1 e nessuno raggiunge il massimo risultato, mentre tutti indistintamente riescono a raggiungere il fondo scala in T_2 .

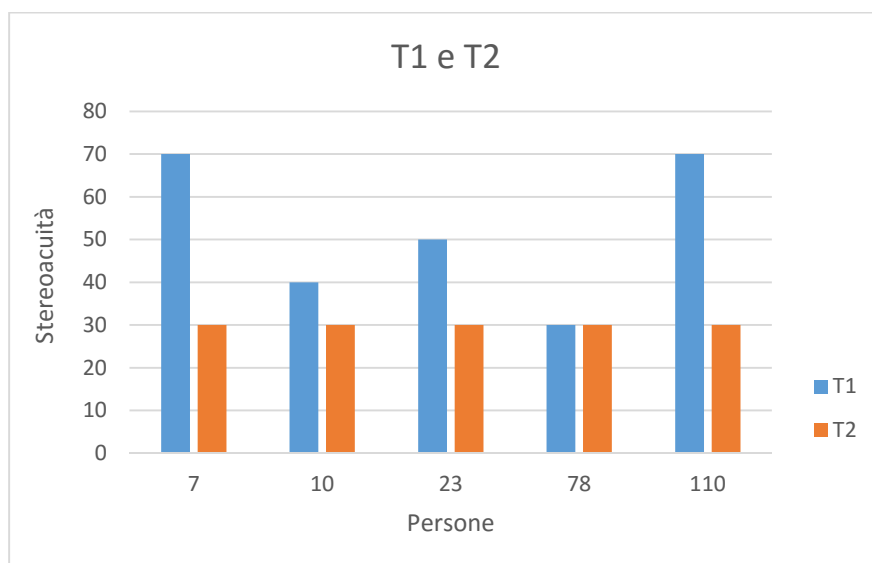


Figura 37: valori di stereoacuità a confronto nei singoli soggetti; gruppo C.

Sembrerebbe, dunque, che il secondo test proponga un task più *semplice*, il che giustificherebbe la migliore stereopsi, e/o che il primo test sia più *sensibile* o, ancora, si generi una piccola differenza nell'insieme della condizione di test.

Discussione

La visione stereoscopica dipende da diversi fattori, ottici e neurali. La base di partenza per una buona stereopsi consiste in una visione binoculare solida e priva di errori sia di natura refrattiva che accomodativa e di vergenza.

I soggetti che hanno partecipato allo studio sono stati scelti in maniera casuale all'interno della popolazione di età superiore ai 7 anni. A partire da questo gruppo iniziale si è operata, poi, una scrematura attraverso dei test preliminari che hanno permesso di isolare i 75 soggetti dotati di una visione binoculare normale secondo i criteri precedentemente illustrati.

Lo studio sperimentale si prefigge l'obiettivo di verificare se test di nuova generazione e tecnologia, quali quello dello schermo, permettono di raggiungere dei risultati affidabili quanto quelli ricavati dalla somministrazione di test presenti da anni nella pratica clinica, come per esempio il Randot Stereotest. Lo scopo è infatti, quello di avere strumenti che garantiscano una valutazione veloce, efficace e soprattutto ottenuta attraverso test che riproducano il più fedelmente possibile le condizioni di visione reale.

È in tale categoria che rientra il software comprendente T_2 , programma che, come è stato illustrato, non solo permette di avere percezione stereoscopica senza l'utilizzo di filtri, ma consente di dissociare la visione senza utilizzo né di polaroid né di prismi, come nel caso del bilanciamento prossimale.

Tenendo conto delle differenze costruttive e di sensibilità tra i due test, e considerando che l'acuità stereoscopica può essere compromessa da riduzioni di AV, sbilanciamento accomodativo tra i due occhi e presenza di forie elevate o di tropie, si è proceduto con la somministrazione dei due test da cui si è rilevata la compatibilità degli stessi. In definitiva, i test possono essere usati in modo generalmente interscambiabile, con alcune differenze per le condizioni del gruppo C (indicazione clinica, in quanto il piccolo campione non consente una generalizzazione).

Un fattore che può aver influenzato le misure è la correzione abituale dei soggetti. Non tutte infatti erano aggiornate, idonee o addirittura, pur essendo prescritte, non venivano usate. Tuttavia, poiché lo scopo dello studio era verificare la compatibilità dei risultati dei test di stereopsi, sottoposti all'osservatore nelle medesime condizioni ambientali, con la stessa correzione e a distanza di qualche secondo l'uno dall'altro, non era necessario raggiungere obbligatoriamente il valore di fondo scala, ma trovare dati sovrapponibili. L'unica ripercussione significativa è stata registrata nella formazione dei due gruppi, dovendo considerare anomali anche coloro i quali, con un'adeguata correzione avrebbero potuto essere inclusi nel gruppo A. Tuttavia, a fronte di questo motivo, l'incidenza di tale aspetto non è risultata così preponderante.

Attraverso un pre-esame si è evidenziato che la somministrazione in sequenza dei due test di stereopsi non falsa i risultati del secondo test visualizzato. Non c'è, quindi, adattamento apparente nelle diverse condizioni di osservazione. Era improbabile che la sola visualizzazione del test avesse un'incidenza così forte. Quello che in realtà può variare tra un test e l'altro e che può, quindi, ripercuotersi anche a livello di risultati, è la relazione tra accomodazione e convergenza in visione prossimale. Come affermato da Banks,⁽³¹⁾ nella visione naturale, il sistema visivo accomoda e converge per la stessa distanza. Invece, i test stereoscopici, obbligano ad accomodare per la distanza del test e a convergere in maniera variabile sulla base della percezione stereoscopica.

Si genera così un conflitto tra accomodazione e convergenza.⁽³²⁾ Come sostenuto dai suoi creatori, il test 3D per il tablet invece, riproducendo nel modo più fedele possibile la visione naturale e non necessitando di filtri, i quali "produrrebbero la dilatazione della pupilla"⁽²⁴⁾, non provoca alterazioni alla relazione tra accomodazione e convergenza. Il motivo per il quale nel 99% dei casi i soggetti con visione normale raggiungono il fondo scala al test T_2 , contro il 92% del test T_1 , può essere ricercato in questo fattore.

Questo potrebbe spiegare anche un'altra perplessità. Essendo che la stereopsi globale richiede un'elaborazione neurale superiore rispetto a quella locale⁽⁴⁾, ci si

sarebbe aspettati di evidenziare maggiori difficoltà in T_2 rispetto a T_1 che è un semi-contornato, cosa che invece non è stata rilevata.

Quindi, sembrerebbe che il garantire il match tra accomodazione e convergenza sia fondamentale per garantire una visione il più naturale ed efficiente possibile.

Inoltre, come mostrato dai grafici dei sottogruppi B, i risultati ottenuti in presenza di $AV > 0,10$ LogMAR e di forie oltre l'intervallo dato da $(3 \pm 6)\Delta$, pur dimostrando maggiori difficoltà nella percezione stereoscopica, sono molto eterogenei e risulta difficile, di conseguenza, trovare un denominatore comune. In aggiunta, molte volte la simultanea presenza sia di anomalie di AV che di forie, ha reso difficile una suddivisione netta tra i sottogruppi. Anche questo fattore risulta di minor rilevanza in quanto esula dal fine della lavoro sperimentale poiché ne rappresenta solo un'ulteriore analisi. In aggiunta, come evidenziato dal caso del soggetto 99, pur in presenza di exoforia elevata (30Δ prossimali), i valori di stereoacuità risultavano nella norma. Ciò suggerisce che i test per la stereopsi non possono essere utilizzati come screening al fine di identificare eventuali deviazioni, ma vanno affiancati a test specifici (come il cover test) per la valutazione della deviazione. Il soggetto 99 può mostrare, plausibilmente, soppressione e assenza di stereopsi in altre condizioni (ad es. stanchezza⁽¹⁾). I test rimangono, però, indicatori dello stato complessivo del sistema visivo binoculare, ovvero della situazione di equilibrio o meno, tra tutte le sue componenti. Nonostante non sia stato verificato, si può ipotizzare che nel caso del soggetto 99 le riserve che si oppongono alla exoforia siano sufficienti a garantire, almeno in fase di test, la fusione e la percezione stereoscopica.

L'unico gruppo in cui i risultati sembrano concordare è il C: in presenza di sbilanciamento accomodativo, si hanno maggiori difficoltà nell'eseguire il compito visivo richiesto dal Randot Stereotest.

Ancora, in letteratura si trova menzione del fatto che la percentuale di persone con una soglia di stereoacuità uguale o migliore di 85" decresce con l'età e la soglia aumenta a partire dai 50 anni.⁽¹⁷⁾ Poiché non se ne ha avuta consistente dimostrazione nello studio, sarebbe interessante approfondire questo aspetto.

Nel proporre il test si è prestata attenzione per evitare il verificarsi di errori molto comuni come: indurre la risposta nel soggetto, permettere il tilting laterale della testa nel tentativo di percepire la profondità, non lasciar osservare per troppo tempo le figure, far vedere il test prima di indossare gli occhiali ed errori di parallasse nell'impugnare il test. Tali accortezze sono molto significative soprattutto considerando che nel Randot Stereotest sono presenti indizi monoculari.

Infine, per quanto concerne l'analisi dei dati di anamnesi si è ritenuto non necessario condurla in quanto il risultato del confronto dei test è di per sé soddisfacente. Sarebbe stata necessaria se non si fosse verificata la concordanza nei test, al fine di ricercare, all'interno della popolazione, le anomalie che hanno dato origine a diversi valori di stereoacuità.

I risultati ottenuti dal confronto delle distribuzioni dei due test hanno dimostrato la compatibilità degli stessi. La validità del T_2 è quindi verificata e anzi, questo si è dimostrato più soddisfacente del Randot in quanto nel $100\% \pm 10\%$ dei casi fornisce risposte uguali o migliori rispetto al T_1 . Rimane l'unico svantaggio per il quale il test somministrato tramite Tablet a schermo 3D è meno sensibile.

Su un totale di 110 persone, quasi la totalità ha ottenuto risultati soddisfacenti, ad eccezione della casistica con problematiche.

Questo ci permette di affermare che il test dello schermo è uno strumento non solo valido quanto quelli già presenti in commercio, ma ha un valore aggiuntivo dato dalla innovativa tecnologia sviluppata dalla RealVision-Kiwie che garantisce visione stereoscopica senza l'utilizzo di filtri.

CONCLUSIONI

Il processo stereoscopico è di natura molto complessa. Non a caso, la sua valutazione qualitativa e quantitativa è utilizzata per avere informazioni complessive sullo stato del sistema visivo in toto.

Diventa ancora più importante se considerato in relazione alla funzione che svolge in primis nella vita quotidiana degli individui e in secondo luogo nell'ambito clinico.

A questo proposito non bisogna dimenticare che i test per la stereopsi locale lavorano a livelli neuronali diversi da quelli della stereopsi globale e quindi, a livello clinico, sarebbe corretto testarli entrambi. ⁽⁴⁾

Il limite è sempre dato dal fatto che i test sono di per se stessi degli artefatti e quindi, per avere dei risultati più affidabili bisognerebbe lavorare con test nello spazio reale, come Howard-Dolman, i quali hanno lo svantaggio di essere poco pratici e di non veloce somministrazione, prerequisiti invece indispensabili nella pratica clinica. È sulla base di tali considerazioni che il risultato di compatibilità ottenuto tramite questo studio assume un significato ulteriore: grazie allo sviluppo delle nuove tecnologie è possibile creare dei test in grado di conciliare in un unico strumento la necessità di realismo con la praticità e l'immediatezza caratterizzanti l'ambiente clinico.

APPENDICE A: questionario di anamnesi

Anamnesi per la visione prossimale - Indicatori di qualità della vita (con derivazioni da questionari COVD-QOL, NEI-QOL, CISS) - V. 1.0 • Per uso didattico – a cura di Anto Rossetti, OD...					
ISTRUZIONI: Risponda alle seguenti domande sulla sua visione e i suoi occhi, con particolare attenzione durante o dopo il lavoro da vicino. Non scriva nulla negli spazi grigi. NB: con “lavoro da vicino” si intende ogni attività visiva di lettura, scrittura o attività al computer o con altro monitor/schermo (telefonino/smartphone/tablet) o altra attività anche manuale a breve distanza.					
Data:	Frequenza				
Soggetto N:	0	1	2	3	4
Note:	Mai	Raramente	Alcune volte	Spesso	Sempre
A Sensazioni non visive (V)					
1 I tuoi occhi si affaticano dopo un lavoro da vicino?					
2 I tuoi occhi bruciano o lacrimano dopo un lavoro da vicino?					
3 Senti i tuoi occhi “sotto sforzo” o in “trazione” durante il lavoro da vicino?					
4 Hai mal di testa durante o dopo il lavoro da vicino?					
5 Ti strofini gli occhi frequentemente o li apri/chiudi (ammicchi) frequentemente?					
6 Ti gira la testa o ti senti stordito dopo un lavoro visivo da vicino?					
7 Hai disturbi allo stomaco dopo un lavoro visivo da vicino?					
8 Avverti dolore o fitte agli occhi durante il lavoro da vicino?					
9 Perdi la concentrazione o non mantieni l’attenzione durante il lavoro da vicino?					
10 Avverti sonnolenza durante il lavoro da vicino?					
B Lettura					
11 Ti pare che la tua lettura sia rallentata?					

12	Hai necessità di rileggere lo stesso rigo durante la lettura?						
13	Perdi il segno durante la lettura o il lavoro da vicino?						
14	Eviti le parole piccole durante la lettura?						
15	Durante la lettura, vedi le parole muoversi, ondeggiare o galleggiare sulla pagina?						
C	Sintomi specifici; Accomodazione e Visione Binoculare						
16	Hai visione annebbiata o difficoltà di messa a fuoco durante il lavoro da vicino?						
17	Hai visione doppia (vedi due oggetti invece di uno) durante il lavoro da vicino?						
18	La tua visione da vicino è instabile o fluttua?						
19	Ti capita di chiudere o coprire un occhio durante il lavoro da vicino?						
20	Inclini la testa durante il lavoro da vicino?						
D	Visione L e passaggio V-L durante la giornata						
21	Vedi confuso per qualche momento nel passaggio tra guardare vicino e guardare lontano?						
22	Vedi confuso poco oltre la distanza di lettura, ossia a distanza intermedia? (ad es. al computer o durante le attività domestiche,..)						
23	La tua visione da lontano è instabile o fluttua o hai difficoltà a mettere a fuoco, anche dopo un lavoro da vicino prolungato?						
24	Vedi peggio alla fine della giornata? (da vicino e/o da lontano)						
E	Abilità						
25	Hai scarsa coordinazione occhio/mano? (ad es. per i lavori di precisione o di cura personale)?						
	Totale parziale						
	Totale (n/100)						

APPENDICE B: Protocollo

SCHEDA TEST						
N° _____ Anno nascita _____ M <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/>			GRUPPO DI CLASSIFICAZIONE: A1 <input type="checkbox"/> A2 <input type="checkbox"/> B1 <input type="checkbox"/> B2 <input type="checkbox"/> B3 <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/>			
Rx uso:	Sf	Cil	Ax	Add	Prisma	Tipologia correzione:
L	OD					Lenti oftalmiche monofocali <input type="checkbox"/>
	OS					Lenti oftalmiche Progressive <input type="checkbox"/>
V	OD					Lenti a contatto <input type="checkbox"/>
	OS					_____
PRE-TEST						
Lontano: (@ 4 m)						
	AV (mira: C di Landolt)	Bilanciamento		Cover Test		
					Tropia	Foria
OD				OR		
OS				VR		
Vicino: (@ 0,40 m)						
	AV (mira: C di Landolt)	Bilanciamento		Cover Test		
					Tropia	Foria
OD				OR		
OS				VR		
TEST STEREOACUITA'						
Vicino: (@ 0,40 m)						
Test 1: _____ secondi d'arco Test 2: _____ secondi d'arco				I° test somministrato: Test 1 <input type="checkbox"/> Test 2 <input type="checkbox"/>		

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

1. **Saladin J. J.**; Phorometry and Stereopsis; in: *Borish's Clinical Refraction*; William J. B.; Butterworth Heinemann Elsevier; s.l.; 2006; pp. 899-960.
2. **Garzia R.P., Steinman B., Steinman S.B.**; *Foundations of binocular vision*; McGraw-Hill; New York; 2000; pp. 173-229.
3. **Lupelli L.**; *Optometria A-Z: dizionario di scienza, tecnica e clinica della visione*; Medical Books; Palermo; 2014; s.v. "stereopsi".
4. **Daum K. M., McCormack G.L.**; Fusion and Binocularity; in: *Borish's Clinical Refraction*; William J. B.; Butterworth Heinemann Elsevier; s.l.; 2006; pp. 145-191.
5. **Elliot D. B.**; *Clinical Procedures in Primary Eye Care*; Elsevier; VI edizione; Philadelphia; 2014; pp. 190-196.
6. **Rossetti A., Gheller P.**; *Manuale di optometria e contattologia*; Zanichelli; II edizione; Bologna; 2003; pp. 153-165.
7. **Blake R., Sekuler R.**; *Perception*; Mc Graw Hill; V edizione; Boston; 2006; pp. 278-294.
8. **Hubel D. H., Wiesel T. N.**; *The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens*; The journal of physiology; 1970; 206(2); pp. 419-436.
9. **Hubel D. H.**; *Occhio, cervello e visione*; Zanichelli; Bologna; 1989; pp.148-153 e 154-161
10. **Grosvenor T.**; *Primary care optometry*; Butterworth Heinemann, V edizione; Boston; 2007; pp. 75-80
11. **Boccignone G.**; *La percezione dello spazio: indizi monoculari*; [http://boccignone.di.unimi.it/Modelli_Percezione_files/LezPMPSpazio\(1\).pdf](http://boccignone.di.unimi.it/Modelli_Percezione_files/LezPMPSpazio(1).pdf)
12. **Robitza W.**, *3D vision: technologies and applications*; <http://slhck.info/documents/robitza-3d-vision.pdf>
13. **Ciuffreda K. J., Griffin J. R., Grisham J. D.**; *Binocular anomalies diagnosis and vision therapy*; Butterworth Heinemann; IV edizione; Amsterdam; 2002; pp. 3-5, 14-15, 60-65.
14. **Evans B. J. W.**; Binocular vision assessment; in: *Optometry: Science, Techniques AND Clinical Management*; Logan N., Rosenfield M.; Butterworth Heinemann Elsevier; II edizione; Edinburgh; 2009; p. 244.
15. **Leat S. J.**; Pediatric assessment; in: *Optometry: Science, Techniques AND Clinical Management*; Logan N., Rosenfield M.; Butterworth Heinemann Elsevier; II edizione; Edinburgh; 2009; p. 443.
16. **Eperjesi F., Rundstrom M. M.**; *Practical binocular vision assessment*; Butterworth Heinemann; s.l.; 2004; pp.59-64.
17. **Schwartz S. H.**; *Visual perception: a clinical orientation*; McGraw-Hill; III edizione; New York; 2004; pp.230-235.
18. **Bear M. F., Connors B. W., Paradiso M. A.**; *Neuroscienze. Esplorando il cervello*; Casco C. (a cura di); Elsevier Masson; III edizione; Milano; 2007; 290-359.

19. **Ghirelli G.**; Anatomia del chiasma; in: *Oftalmologia*; Bucci M. G.; Seu; 1993; p.372.
20. **Casco C.**; *Vedere*; Bollati Boringhieri; Torino; 1992; pp. 224-231.
21. **Gregory R. L.**; *Occhio e cervello. La psicologia del vedere*; R. Cortina; Milano; 1998; pp. 86-95.
22. **Westall C.**; Visual development; in: *Optometry: Science, Techniques AND Clinical Managment*; Logan N., Rosenfield M.; Butterworth Heinemann Elsevier; II edizione; Edinburgh; 2009; pp. 37-49.
23. **Han S.B., Hong J.Y., Hong K., Hwang J.M., Kim J., Lee B., Yang H.K.**, *Glasses-free randot stereotest*; Journal of Biomedical Optics; giugno 2015.
24. *RealVision-Kiwie*; http://www.realvision.it/wp-content/uploads/2015/11/Realvision-Medical-laparoscopic-v2_UK.pdf
25. *3D near vision tablet without polarized glasses*; <http://www.realvision.it/3d-near-vision-tablet-without-polarized-glasses/>
26. **Bougrenet de la Tognaye J.L., Cochener B, Ferragut S., Iorgovan D., Fattakhova Y., Lamard M.**; *Supervised stereo visual acuity tests implemented on 3D TV monitors*; Journal of display technology; vol. 8, no. 8; agosto 2012.
27. **Scheiman M., Wick B.**; *Clinical management of binocular vision: heterophoric accomodative and eye movement disorders*; Lippincott Williams & Wilkins; II edizione Philadelphia; 2002.
28. **Bach M.**; *The Freiburg Visual Acuity Test-Automatic Measurement of Visual Acuity*; Optometry and Vision Science; Vol. 73, No 1; 1996; pp.49-53.
29. **Bach M.**; *The Freiburg Visual Acuity Test- Variability unchanged by post-hoc re-analysis*; Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.; 2007.
30. **Cannavò E., Rossetti A.**; *Evaluation of central suppression in presbyopic subjects with usual correction*; *European Academy of Optometry and Optics, Warsaw, 2014*. Poster presentation winner. Derivato dalla tesi di laurea di Cannavò E, Università di Padova.
31. **Banks M. S., Read J. C.A., Allison R. S., Watt S. J.**; *Stereoscopy and the Human Visual Sistem*; SMPTE motion imaging; 2012.
32. **Schowengerdt B. T., Seibel E. J.**; *True Three-Dimensional Displays that allow viewers to dinamicly shift accomodation, bringing objects displayed at different viewing distances into and out of focus*; *CyberPsychology & Behaviour*; febbraio 2005; pp. 610-620.

RINGRAZIAMENTI

Vorrei cogliere l'occasione per ringraziare di cuore tutte le persone che con pazienza e generosità si sono prestate come soggetti per questo lavoro sperimentale. Senza di voi nulla di tutto ciò sarebbe stato possibile.

Un grazie particolare lo rivolgo a "Zeroventitrè Ottica" e a tutto il suo staff. Mettendo a disposizione spazi, strumenti e aiutandomi nella ricerca di persone che acconsentissero a sottoporsi allo studio, mi ha permesso, durante il periodo di tirocinio curricolare, di raccogliere parte dei dati necessari per raggiungere questo traguardo.

L'ultimo e più importante ringraziamento lo voglio dedicare a tutte le persone a me più care. A Renato, Ornella, Francesca e Damiano, che mi hanno visto nascere e crescere e non mi abbandonano mai nonostante tutto, a chi sa supplire con amore alle mie mancanze e dimenticanze, a chi sceglie di essere ogni giorno parte della mia vita, grazie! Il vostro supporto non è stato indispensabile solo in questi ultimi mesi. È stato essenziale lungo tutto il cammino che mi ha condotta fin qui.