

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di laurea in Ottica e Optometria

Tesi di laurea

Visual Training e Realtà Virtuale

Visual Training and Virtual Reality

Relatore
Prof. Marino Formenti

Correlatrice
Prof.ssa Dominga Ortolan

Laureando: Da Forno Michele Matricola:1105996

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Abstract	1
Introduzione	3
1. Il visual training	5
2. VR Virtual Reality – Realtà Virtuale	9
2.1. HMD Head Mouted Display	13
2.2. Standalone VR	14
3. Trattamento difetti visivi	15
3.1. L'ampliopia	15
3.2. La stereopsi	24
3.3. L'insufficienza di convergenza	32
4. Limiti e controindicazioni della realtà virtuale	37
4.1. La cinetosi	38
Conclusioni	41
Bibliografia e sitografia	43

Abstract

Obiettivo: Lo scopo dell'elaborato è di individuare la possibile interazione tra la realtà virtuale e l'optometria, in particolare nei trattamenti di visual training. Descrive principalmente la tecnologia, gli strumenti e il trattamento usato da vari studi effettuati da ricercatori che hanno riportato risultati chiave per dimostrare che la realtà virtuale può essere utilizzata come metodo di rieducazione delle funzionalità visive integrando gli strumenti e i test attuali per l'optometria.

Metodo: Attraverso l'uso di specifiche strumentazioni per la realtà virtuale, composte da hardware e software, diversi ricercatori hanno testato questa tecnologia su determinate disfunzioni visive tra cui l'ambliopia, la percezione della profondità stereoscopica anomala e l'insufficienza di convergenza.

Risultati: i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti in quanto hanno dimostrato che la realtà virtuale può essere un efficace supplemento ai metodi finora usati per il visual training anche se sussistono dei limiti nei risultati dei test dovuti alla dimensione del campione, alla mancanza di follow-up e di un gruppo di controllo necessari per la verifica nel tempo dei risultati ottenuti.

Introduzione

La vita di tutti i giorni ci pone davanti a costanti attività, che richiedono una vasta quantità di elaborazione dei dati da parte del nostro cervello e del nostro sistema visivo. La visione è un processo dominante dell'organismo per ottenere informazioni dall'ambiente. È il più complesso sistema di guida per i movimenti (coordinazione visuo-motoria) e la deambulazione. Il sistema visivo è il senso che mette in relazione l'essere umano con l'ambiente in modo privilegiato rispetto agli altri quattro sensi.

Se la visione manca, gli altri sensi possono sostituirla senza però fornire sia in quantità sia in qualità l'arricchimento di un sistema visivo maturo. Quest'ultimo è un processo costituito dall'integrazione di diverse abilità e competenze come possedere un'adeguata acutezza visiva, la capacità di muovere gli occhi in modo congiunto e coordinato nello spazio come per esempio durante l'inseguimento di un oggetto che si muove nel campo visivo, la facoltà di mettere a fuoco a tutte le distanze, l'abilità di convergere gli occhi simultaneamente su uno stesso oggetto a distanze ravvicinate, intermedie e lontane senza sfuocamenti e con flessibilità, la possibilità di avere una percezione dell'intero campo visivo. L'insieme di questi processi assicurano la visione binoculare che quindi non può essere presente alla nascita, ma è un traguardo che dovrà essere acquisito ed imparato durante l'età del primo sviluppo, maggiormente nella fase da 0 a 2 anni e che si raffina in una fase successiva e si prolunga fino agli 8 anni. Dopo questa età tutto ciò che non si è maturato o non è stato acquisito è irrimediabilmente perso. Ciò può accadere quando il patrimonio genetico dell'individuo ha in sé dei deficit strutturali che non consentono l'adeguato sviluppo degli strumenti neuro-sensoriali, oppure quando la presenza di una precoce ed elevata ametropia, non evidenziata e non compensata in tempo, non consente lo sviluppo della necessaria esperienza visiva.¹ Dagli studi di McKee, Levi e Movshon (Levi & Movshon, 2003), si è dimostrato che circa il 3% della popolazione lamenta disturbi binoculari di cui 1 persona su 20 (Stelmach & Tam, 1996), a causa di una visione binoculare compromessa nei primi anni di vita. Inoltre, secondo le linee guida dell'AOA (American Optometry Association), la scoperta e il trattamento delle anomalie della visione binoculare sono di fondamentale importanza nella popolazione studentesca, in quanto disfunzioni accomodative e di convergenza potrebbero compromettere l'attenzione e la capacità di lettura degli studenti (Palomo et al, 2010). Uno studio, condotto nel 2017 presso un centro per la disabilità di apprendimento, ha riscontra-

to che su 94 ragazzi con un'età media di 15 anni, 59 di loro (62,8%) presentavano un'anomalia della visione binoculare.² Anche in ambito lavorativo e sportivo le disfunzioni binoculari possono portare notevoli disagi ad esempio in molti sport la visione binoculare è l'indizio visivo più importante per l'orientamento spaziale, in quanto consente agli atleti di estrarre informazioni precise sulla posizione degli oggetti in ambienti tridimensionali (3D) (Jackson et al., 1997).³ È cruciale per la percezione dell'atleta in situazioni sia statiche che dinamiche rispetto alla posizione del bersaglio (es. palla), nonché alla velocità e alla distanza del bersaglio (Coffey e Reichow, 1990; Bauer et al., 2001; Laby et al., 2011).⁴ La visione binoculare normale richiede un allineamento accurato degli occhi e meccanismi binoculari per la funzione di vergenza, fusione sensoriale e stereopsis (Thorn et al., 1994).⁵ Ecco perché occorre intervenire tempestivamente per poter integrare le funzioni visive. Innanzitutto occorre correggere il soggetto da un eventuale ametropia e successivamente si può intraprendere la tecnica del visual training che è un'efficace modalità di trattamento per molti tipi di problemi che interessano il sistema visivo. Il VT comprende la diagnosi, il trattamento e la gestione dei disturbi e delle disfunzioni del sistema visivo, tra cui, le condizioni che coinvolgono binocularità, accomodazione, disturbi oculomotori e disfunzioni visuo-percettivo-motorie.

1. Il Visual Training

Il Visual Training costituisce un trattamento per migliorare, allenare le abilità visive in modo coordinato al fine di riuscire a migliorare la performance visiva che permette sicuramente un implemento in tutti gli aspetti della vita. Lo possiamo inoltre indicare, come il metodo per la correzione e terapia dei problemi visivi nonché il miglioramento e l'ottimizzazione delle abilità visive per permettere all'individuo di operare al suo più alto livello di rendimento al lavoro e nello sport.

L'American Optometric Association (A.O.A.) definisce così il Visual Training:

"The remedial and enhancement procedures used to modify visual performance. Procedures involving the arrangement of the conditions for learning through the use of prescribed visual environments and tasks, the use of lenses and prisms, and the use of specific equipment for developing or changing selected visual functions. Any visual behavior, anomalies, or physiological processes which can be improved or controlled as a function of specific practice or training procedures are within the scope of visual training".

I problemi visivi rieducabili con il Visual Training includono le disfunzioni oculomotorie, le disfunzioni binoculari e accomodative, lo strabismo, l'ambliopia, il nistagmo e certe difficoltà visuo-percettivo-motorie. Si tratta di una terapia non medica, atta a modificare il funzionamento del processo visivo. Implica in alcuni casi una serie di sedute pianificate in studio sotto la supervisione di un optometrista ed esercizi da fare a domicilio in altri possono essere sufficienti le sole sedute in studio. Il visual training non lavora solo sui muscoli ma rieduca le funzioni che fanno capo ad un insieme di parti del corpo (sistema visivo e posturale nella sua totalità). Attraverso di esso si ottiene una migliore possibilità di interpretare e comprendere l'informazione visiva, si ottiene una migliore coordinazione nel movimento, visivamente guidato, e migliora gli aspetti posturali connessi alla visione.⁶ Tramite il Visual Training si può allenare la via visuale andando così a modificare le disfunzioni visive. Il neurone è l'unità strutturale e funzionale del sistema nervoso. Consiste in:

- Corpo, da dove escono multiple prolungazioni fini ramificate che si chiamano dendriti, con spine nella loro superficie.

- Assone, è una prolungazione unica e più grossa, che finisce con una o varie terminazioni chiamate bottoni sinaptici, dove, all'interno di vescicole, si sintetizza e si conserva il neurotrasmettitore.

I neuroni comunicano tra di loro attraverso una zona denominata sinapsi. Una tipica sinapsi chimica si forma dalla membrana presinaptica nel bottone sinaptico dell'assone e la membrana postsinaptica in una delle spine dei dendriti. Esattamente qui, nelle sinapsi avvengono i cambiamenti creati grazie al Visual Training. (Fig.1)

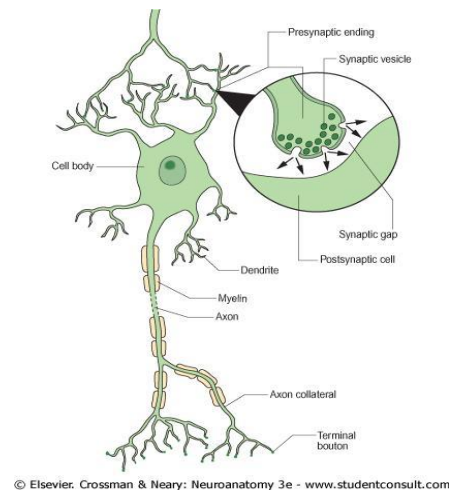


Fig. 1 Sinapsi neurale

La plasticità neurale si basa sui cambi morfologici della sinapsi, più concretamente nella neoformazione, distruzione e ristrutturazione delle ramificazioni dei bottoni sinaptici e delle spine sinaptiche con i loro recettori. Questo processo è chiamato plasticità sinaptica. Negli anni '70 Bliss e Lomo scoprirono che stimolando i circuiti neurali dell'ippocampo il numero delle connessioni sinaptiche aumentava nel tempo. È il cosiddetto fenomeno della plasticità a lungo termine o potenziale a lungo termine. Esiste però anche la possibilità di una depressione a lungo termine nel cervello. Esistono due concetti che giustificano la plasticità a lungo termine. La facilità sinaptica: se si stimola rapidamente e ripetitivamente una terminazione presinaptica durante un tempo limitato senza arrivare all'affaticamento della trasmissione sinaptica, il neurone risponderà meglio e più rapidamente ai nuovi impulsi che gli arriveranno. La moltiplicazione sinaptica: se si stimola ripetitivamente per vari giorni una terminazione presinaptica, durante un tempo limitato senza arrivare all'affaticamento della trasmissione sinaptica, il neurone moltiplicherà i suoi terminali presinaptici (più bottoni e assoni) e postsinaptici (più

spine sui dendriti), aumenterà così la quantità di sinapsi che uniscono i neuroni. Questi due meccanismi facilitano rispettivamente la sommatoria temporale e spaziale degli impulsi nervosi che riceverà il neurone posteriore alla sinapsi facilitata, migliorando l'intensità e la velocità della conduzione nervosa. Oggigiorno si riconosce anche la neurogenesi adulta, capacità che ha il cervello di produrre nuove cellule nervose durante tutta la vita. In alcune zone del cervello come l'ippocampo, zona fondamentale per l'apprendimento, incaricata di ricevere e ordinare temporalmente e spazialmente le informazioni che in un futuro rimarranno in memoria, si generano nuovi neuroni in risposta agli stimoli provenienti dell'esterno. Possiamo dire che il cervello non è una materia rigida, incapace di modificare la sua struttura una volta sviluppato, ma presenta una plasticità considerevole. È vero che la plasticità diminuisce con l'età, però non si perde mai completamente, soprattutto se non si smette di stimolarla. Questo spiega perché una vita attiva fisicamente e intellettualmente diminuisce il rischio di degenerazioni cerebrali legate all'età.⁷ Dalla nascita del Visual Training nel 1937, quando Crow e Fuog introdussero il concetto dei *visual skills* (le abilità visive) e il relativo miglioramento grazie al Visual Training pubblicando una serie di articoli⁸, al giorno d'oggi, diversi professionisti hanno contribuito alla diffusione e al miglioramento di questa tecnica. Sono sempre stati usati test meccanici e fisici come anaglifici e filtri polarizzati, lenti, prismi e specchi, aperture e separatori, stereoscopi e post immagini, fenomeni entottici e tecniche elettrofisiologiche. Lo scopo del Visual Training però, oltre a migliorare e allenare il nostro sistema visivo, è anche quello di aiutare il soggetto a sviluppare una maggiore consapevolezza di se stesso e perciò di potere integrare maggiore informazione in un minor tempo e con un minimo sforzo. Ciò avviene mediante l'allenamento della concentrazione. La visione viene appresa ed è, perciò, rieducabile. Essa costituisce il risultato finale del processo mentale generato dall'informazione ottenuta dai vari sistemi corporei: vista, postura, consapevolezza corporea interna, udito, tatto e odorato. La visione viene "nutrita" dalle esperienze individuali, dalla nascita alla morte. L'interpretazione di tali esperienze è diversa da una persona all'altra. Non si tratta di migliorare la forza muscolare ma di migliorare il controllo visivo.⁹ Recentemente, grazie alle nuove scoperte tecnologiche, è stato riscontrato che è possibile eseguire l'allenamento visivo anche grazie alla realtà virtuale.

2. VR *virtual reality* – Realtà Virtuale

Possiamo definire la realtà virtuale come un ambiente esclusivamente digitale creato da uno o più computer che simula la realtà effettiva e la ricrea in modo tangibile. Questo ambiente viene veicolato ai nostri sensi mediante delle console che consentono un'interazione in tempo reale con tutto ciò che viene prodotto all'interno di tale mondo. Questo scambio di dati è permesso da dispositivi informatici, per la maggior parte visori per la vista, guanti per il tatto e auricolari per l'udito, e consentono un'immersione completa nella simulazione creata in modo tridimensionale e dinamico accedendo a tutta una serie preordinata di contenuti che vengono esplorati in modo da costruire un vero e proprio mondo parallelo verosimile.¹⁰ Nel 1957 il regista Morton Heilig creò Sensorama, un apparecchio pensato per immergere lo spettatore all'interno dell'esperienza cinematografica.¹¹ Questo macchinario riusciva a stimolare tutti e 5 i sensi, con immagini stroboscopiche per la vista, altoparlanti per l'udito, aromi e odori per l'olfatto e il gusto, flussi di aria attraverso il viso e il collo e un manubrio per le mani e le braccia per il tatto; era inoltre corredato da una poltroncina dotata di contrappesi e leve per le sensazioni di ondeggiamento del corpo e dell'equilibrio. (Fig.2)

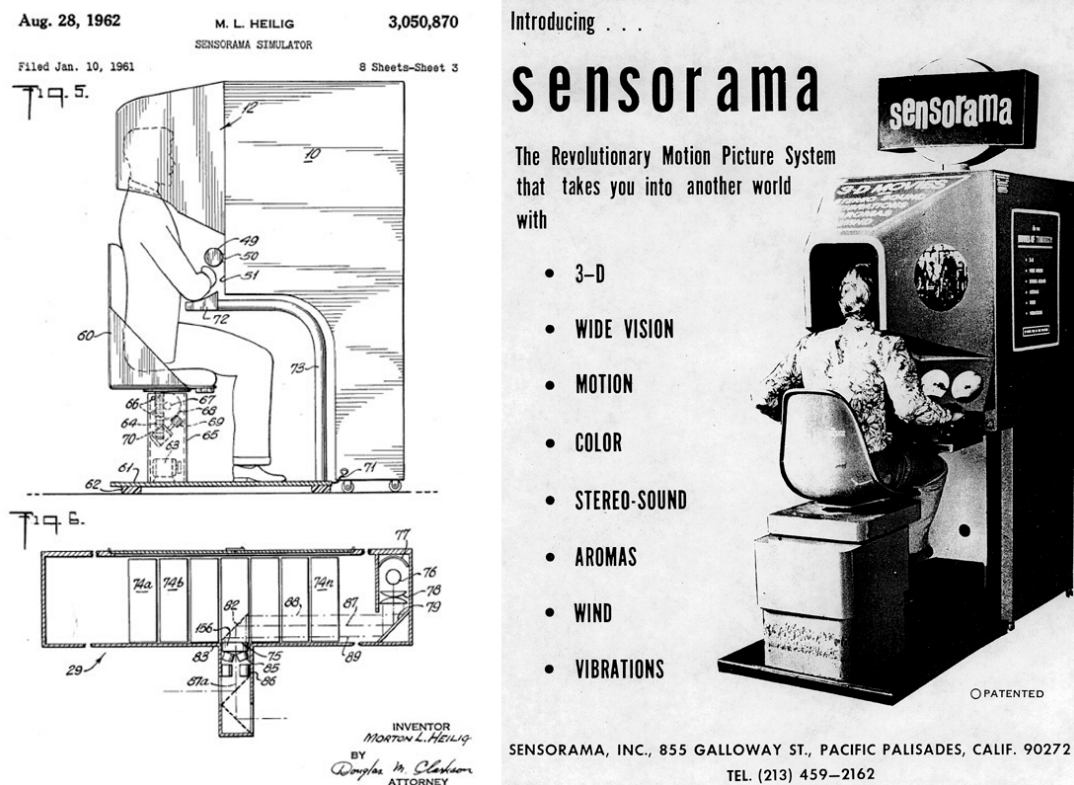


Fig. 2 Sensorama

Il primo esempio di realtà digitale per come la conosciamo oggi però, è stato realizzato alla fine degli anni sessanta con gli studi compiuti da Ivan Sutherland nell'Università dello Utah che ha permesso la costruzione del primo visore di realtà virtuale (VR).¹²

La VR può essere suddivisa in due branche: la Realtà Virtuale immersiva e quella non immersiva. Nel primo caso l'utente viene completamente isolato dall'ambiente esterno e viene trasportato nella realtà parallela riprodotta e in essa viene assorbito completamente grazie anche a un insieme complesso di accessori che integrano i visori professionali. Nel secondo caso invece l'ambiente ricreato digitalmente ha un minore impatto emotivo sul soggetto che è all'interno dello stesso e questo avviene anche in conseguenza della qualità dei visori. Per poter usufruire in maniera completa della realtà virtuale è necessario che la sua architettura sia composta da visori che abbiano determinate caratteristiche quali ad esempio un campo visivo dai 100 ai 110 gradi, un frame rate (frequenza di immagini proiettate al secondo) compreso tra un minimo di almeno 60fps ed un massimo di 120fps per evitare una visione a scatti fastidiosa agli occhi, un giroscopio che consenta, insieme a un accelerometro ed a un magnetometro, il cosiddetto *Head Tracking* ovvero lo spostamento dell'immagine seguendo esattamente i movimenti del capo lungo i quattro punti cardinali e con tempi di risposta dai cinquanta millisecondi ai trenta millisecondi. Tutto questo è sviluppato volutamente per far sì che l'utente possa interagire e "vivere" all'interno della realtà virtuale e nel mondo reale infatti quando sentiamo un rumore, giriamo il nostro sguardo verso la fonte del suono; questo nella Realtà Virtuale è permesso sia dalla presenza all'interno del visore di un sistema audio professionale multicanale che offre la sensazione di suoni che provengono da tutte le direzioni e che consentano il cosiddetto effetto doppler (con l'aumentare del suono in avvicinamento e il diminuire in allontanamento), sia da un sofisticato sistema di puntamento a infrarossi che consente di leggere il movimento oculare, il cosiddetto *eye tracking*, rendendo ancora più realistica l'immersione nell'ambiente virtuale mediante la creazione della profondità di campo.¹³

Quando si parla di realtà virtuale, il primo oggetto cui pensiamo è il visore 3D, un dispositivo a forma di casco o di occhiali che consente di vivere un'esperienza sensoriale in un mondo "parallelo" ma tangibile.¹⁴

I visori per realtà virtuale sono dei dispositivi montati sulla testa che forniscono la visione della realtà virtuale per chi lo indossa. Comprendono un display stereoscopico

montato sul nostro capo che fornisce immagini separate per ciascun occhio, un suono stereo e sensori di rilevamento del movimento della testa (che possono includere giroscopi, accelerometri e sistemi di illuminazione strutturati), per questo motivo nei visori per la VR il coinvolgimento emotivo è molto potente e gioca sulla stimolazione profonda dei sensi:

- **Vista:** la produzione iper-dettagliata e stereoscopica realizzata con un ampio campo visivo è composta da oggetti prettamente riprodotti dal vero grazie a foto in alta definizione e panoramiche, oppure è la riproduzione di oggetti esistenti o inesistenti creati da *3D artist* che hanno portato all'esterno le competenze acquisite sui videogiochi aggiungendo luci, riflessi, opacità, tridimensionalità, imperfezioni volute per oggetti che poi non si trovano più di fronte, come su uno schermo, ma attorno a noi.
- **Udito:** oltre al campo visivo viene anche stimolato l'udito grazie a delle cuffie che riproducono il cosiddetto audio 3D, ovvero un audio che non tiene conto del bilanciamento destro/sinistro e davanti/dietro ma riesce anche a creare situazioni di profondità e di distanza, avvicinamento e allontanamento.
- **Movimento:** la totale libertà di visione e soprattutto la libertà di movimento all'interno degli ambienti sono rese possibili da un particolare tracciamento dei movimenti operato dal visore, denominato *Motion Tracking* e suddivisibile in:
 - *Eye Tracking*: misurazione, con microcamera situata all'interno del dispositivo che indossiamo, dei movimenti degli occhi, con focus sull'attenzione dell'utente per reagire di conseguenza;
 - *Body Tracking*: osservazione nel movimento del visore attraverso sensori infrarossi e fotocellule;
 - *Head Tracking* tracciamento dei movimenti della testa in base a un principio chiamato *& Degrees Of Freedom (&DOF)* ovvero l'abilità di movimento all'interno dello spazio tridimensionale. Bisogna immaginare un piano cartesiano (XYZ) con l'origine posta al centro della testa dell'utente; un visore VR può ottenere una libertà di movimento e di rotazione su tutti gli assi, e tracciare così ogni possibile spostamento (Fig. 3)

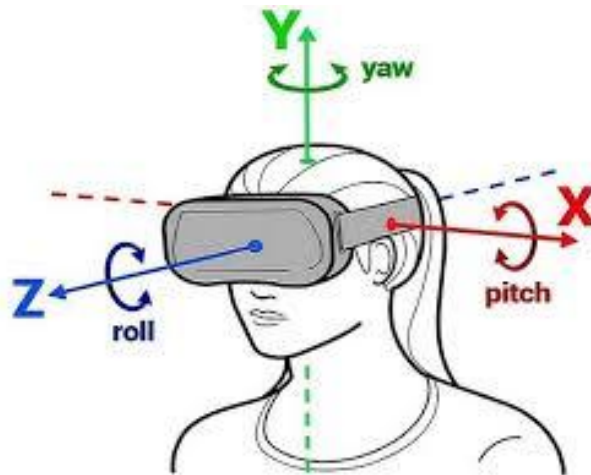


Fig. 3 Piano cartesiano xyz dove il visore VR ha la possibilità di muoversi.

Possiamo classificare diversi tipi di dispositivi:

- Visori con lo smartphone: sono i dispositivi più economici, che usano come schermo e processore quelli dello smartphone facendo uso di software e applicazioni scaricabili dalla rete.
- HMD “Head Mounted Display”: sono dispositivi complessi che vanno necessariamente collegati a un potente computer, tendenzialmente dedicato anch’esso alla realtà virtuale.
- *Standalone*: come dice la parola stessa, sono visori indipendenti da smartphone e da computer.

Dal punto di vista dell’applicazione in ambito optometrico i visori per la realtà virtuale con lo smartphone non garantiscono buoni risultati, pertanto, di seguito, verranno approfondite le altre due tecnologie citate.¹⁵

2.1 HMD *Head Mounted Display*

Gli *Head Mounted Display* (HMD) hanno cuffie per l'audio 3D e sono gestiti tramite altri dispositivi che assomigliano vagamente delle piccolissime “racchette” che si impugnano. I computer cui sono collegati e i software nativi sono dedicati solo ed esclusivamente alla VR. Un esempio concreto è l'Oculus Rift, inventato da Luckey Palmer nel 2010 a Long Beach, California. Questo visore è dotato di due “camere”, ovvero rilevatori di movimento del corpo, che vengono posizionati di fronte al monitor/TV. Questi due oggetti, che assomigliano a due microfoni, riproducono in digitale qualsiasi movimento del corpo, la direzione in cui ci si muove; se si alza una gamba, un braccio, le mani, tutto viene riprodotto al millimetro in VR.

Un altro brand molto conosciuto che produce un dispositivo HMD è l'HTC con il suo HTC Vive. Possiede due rilevatori di movimento come Oculus Rift. Le differenze con Oculus esistono ma sono legate agli aspetti più tecnici piuttosto che al reale percepito dell'utenza media, che talvolta predilige la leggerezza di Oculus; l'utenza professionale invece tende a preferire HTC in casi di grafica spinta al limite, soprattutto per il *motion tracking*; la cosiddetta *room scale* ovvero la riproduzione dei movimenti in scala tra realtà e VR è molto più ampia e quindi più precisa.¹⁶

2.2 Standalone VR

Gli Standalone VR sono i device che saranno appunto “soli”, quindi senza smartphone o senza computer, e rappresentano una nuova tecnologia, venuta alla luce alla fine del 2017.

Un'altra tecnologia da tenere in considerazione sono i primi PC “VR ready”, ovvero pronti per essere usati in VR, sono stati quelli in origine destinati ai videogiocatori, per le ovvie similitudini di impiego. Parliamo di macchine molto potenti che “supportano” la potenza di calcolo della VR, dotate di schede video straordinarie per reggere tutto il software 3D che gli gira sopra. Hanno un'estetica molto particolare, ricca di squadrature e luci. I software e i motori usati invece sono principalmente due, Unity e Unreal. Offrono una serie di tool per gestire la VR in tutte le sue forme e destinazioni.¹⁷

3. Trattamento difetti visivi

3.1 L'ambliopia

L'ambliopia la possiamo classificare come un'anomalia della percezione visiva e con il suo termine s'intende una riduzione dell'acuità visiva, prevalentemente centrale, senza alcuna alterazione identificabile con i mezzi clinici usuali. Come criterio clinico invece, si definisce ambliopia una differenza (significativa) tra il visus dei due occhi superiore a 3/10 o un visus inferiore a 3/10. Secondo Levi (1994 cit in Evans 2006) l'ambliopia può insorgere qualora un occhio sia privato della possibilità di vedere durante il periodo critico, cioè nei primi 18 mesi di vita dove la criticità decresce fino ad annullarsi ai 6-8 anni circa, oppure può essere conseguente, ma non necessariamente, allo strabismo. Possiamo distinguere due forme di ambliopia, una funzionale e una organica. Nel primo caso le strutture appaiono funzionali e si considera che l'anomalia sia legata a uno sviluppo visivo e neuronale (Wiesel e Hubel 1963, 1965) nel secondo invece, la probabile causa è un'alterazione delle vie ottiche. La forma funzionale può essere trattata mentre in quella organica la terapia è relativa alla causa e, spesso, inefficace. Parlando della forma funzionale, l'ambliopia da interazione binoculare anomala può essere frequente conseguenza di una deviazione (ambliopia strabica) oppure da una anisometropia, anisometropia o da errori refrattivi. Quando la visione è impedita da cataratte, opacità o soppressione l'ambliopia è detta anche ex anopsia o ambliopia da deprivazione.¹⁸

In questa condizione, c'è un'esperienza anormale della visione binoculare a causa di una mancata corrispondenza tra le immagini percepite con ciascun occhio. Questa situazione può essere causata da privazione visiva a causa di una cataratta congenita, errori di rifrazione di varia gradazione o strabismo. La prevalenza media dell'ambliopia è stimata tra il 2 e il 5%. Mantenere un'alterazione monoculare permanente è un grande fattore di rischio per la visione perché se in futuro l'occhio dominante subirà dei danni o l'insorgenza di una malattia l'occhio ambliope non potrà essere adoperato per la visione. Per questo motivo, il trattamento precoce di questa condizione è cruciale. I trattamenti *gold standard* in ambliopia sono le terapie penalizzanti, come il *patching* (cioè l'occlusione con il cerotto) o la visione offuscata con atropina che mirano a forzare l'uso dell'occhio ambliope. Questo tipo di trattamento con l'ambliopia può essere efficace fino a 7 anni. Il recupero delle normali funzioni visive è ritenuto quasi impossibile dopo

la fine del periodo critico, cioè dopo 8 anni di età nei bambini. Tuttavia, esistono diversi studi sugli animali e sull'uomo che mostrano la plasticità del percorso visivo anche dopo che il periodo critico è passato, essendo pazienti che hanno perso la visione nell'occhio "buono". La momentanea perdita visiva dell'occhio permetterebbe di riattivare le connessioni esistenti. Questo potrebbe essere il risultato di uno smascheramento o aree cerebrali superiori che imparano a prestare attenzione ai segnali precedentemente inibiti dall'occhio ambliope. La terapia della visione dopo la fine del periodo critico può comportare un miglioramento della visione e della binocularità. Gli studi sui videogiochi giocati dagli adulti per il trattamento dell'ambliopia hanno mostrato un certo grado di recupero visivo nell'occhio ambliope. Pertanto, il periodo critico dovrebbe essere considerato solo come il tempo della massima plasticità neurologica. Secondo uno studio preliminare condotto, i ricercatori hanno valutato l'effetto del training visivo dicoptico (i due occhi vedono due cose distinte) usando la realtà virtuale in un campione di adulti ambliopici al fine di valutare l'utilità potenziale di questa opzione di trattamento.

In questo studio sono stati arruolati un totale di 17 soggetti ambliopici (10 uomini, 7 donne) con un'età media di 31,2 anni (intervallo, 17-69 anni). I criteri di inclusione erano dei soggetti con ambliopia anisometropica, un'età di 17 anni o più e che intendevano eseguire l'allenamento visivo. I criteri di esclusione invece sono stati: lo strabismo, precedente chirurgia oculare, irregolarità corneale, opacizzazione dei mezzi oculari inclusa cataratta e malattia oculare attiva. Tutti i pazienti sono stati sottoposti a un esame oftalmologico di base comprendente test visivo, refrazione manifesta e cicloplegica, test di copertura, test a quattro punti, esame del segmento anteriore con lampada a fessura, topografia corneale e funduscopy. Sono state misurate la miglior acuità visiva e la stereocuità prima e dopo il programma di allenamento dicoptico. La formazione visiva dicoptica è stata eseguita utilizzando la versione beta del videogioco Diplopia Game (Vivid Vision, San Francisco, USA) che è stata eseguita su un dispositivo per la realtà virtuale chiamato Oculus Rift OC DK2. (Fig.4)



Fig.4 Oculus Rift DK2 setup. Sullo schermo LCD viene mostrato ciò che i pazienti vedono all'interno del display montato sulla testa.

Sono stati eseguiti due giochi, il primo si chiama “Space Game” in cui i soggetti volavano su un’ astronave attraverso un sistema di anelli mentre il secondo si chiama “Breaker Game” che è un tipico gioco a blocchi, ma giocato in una realtà virtuale in 3D. Entrambi i giochi avevano un contesto dicoptico in cui la parte centrale dell'immagine mostrata era diversa. Nel gioco Space Game, l'astronave era visibile solo con l'occhio che fissava mentre le porte colorate e gli asteroidi erano visibili solo con l'occhio ambliope (Fig.5)

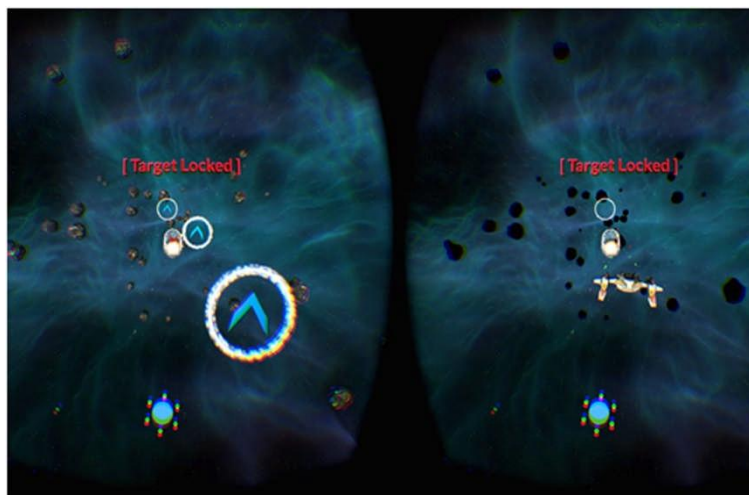


Fig.5 Esempio del gioco di addestramento dicoptico visto attraverso la visualizzazione dell’Oculus nella realtà virtuale. L'occhio ambliope vede la metà sinistra del display, in cui il paziente vede le porte con all'interno la freccia blu per far volare l'astronave attraverso di esse. L'astronave è vista solo con l'occhio dominante, la parte destra della figura.

per evitare di barare perché se tutti gli oggetti del gioco sono visti con l'occhio ambliope, il paziente potrebbe semplicemente chiudere l'occhio dominante e "imbrogliare". Poiché alcuni oggetti sono visti con l'occhio ambliope e altri sono visti con l'occhio sano, il gioco costringe il cervello a usare entrambi gli occhi per giocare. Ogni soggetto è stato sottoposto a 8 sessioni di formazione, da svolgere due volte a settimana. Ogni sessione includeva 40 minuti di allenamento con 2 giochi diversi (20 minuti per partita). La miglior acuità visiva corretta è stata testata prima e dopo l'ultima sessione di allenamento. Il paziente non ha svolto nessun altro allenamento visivo durante il periodo di allenamento dicoptico. Dieci pazienti sono stati trattati con la tecnica patching quando erano bambini, ma non si ricordavano per quanto tempo.

La Tabella 1 riassume i principali dati clinici dei pazienti inclusi nello studio.

Table 1 Baseline characteristics and results of the sample of patients that performed the virtual reality dichoptic training using the Oculus Rift virtual reality head mounted display

Patient	Healthy eye (Dsph. Dcyl)	Amblyopic eye (Dsph. Dcyl)	BCVA -before DT	BCVA -after DT	Stereoacuity -before DT	Stereoacuity -after DT		
1	+0.5	+1	-0.5	+3.50	0.9	0.9	nil	nil
2	+0.75	+1.5	+2.37	+0.75	1.3	1.3	nil	400
3	+0.25	+0.5	+4.5	+2.5	0.5	0.4	nil	140
4	-2.5	+1	-3.5	+1	0.6	0.5	nil	50
5	+0.50	0	+7.00	+0.5	0.4	0.3	400	400
6	+2	+0.5	+3.00	+1.0	0.4	0.3	200	200
7	-0.12	+0.75	+1.5	+1.0	0.1	0.0	70	50
8	+0.25	+0.5	+3.00	+0.5	0.2	0.1	140	20
9	+0.75	0	+3.75	+0.5	0.2	0.0	400	160
10	+0.25	+0.5	+1.00	+1.5	0.3	0.0	200	20
11	+0.5	+0.5	+4.25	+1.0	0.5	0.4	400	140
12	+0.50	0	+2.25	+1.5	0.5	0.4	nil	400
13	+0.25	0	+1.75	+3.0	1.0	0.5	nil	400
14	+0.5	+1.0	+2.50	0	0.3	0.3	400	50
15	+0.5	+0.5	+4.0	+1.0	0.5	0.1	160	20
16	-8.0	+1.0	-12.0	+2	1.0	0.7	nil	nil
17	0	0	+1.87	+0.75	1.1	1.1	nil	200

Abbreviations: SE spherical equivalent, BCVA best corrected visual acuity, DT dichoptic training

Analogamente, la Tabella 1 include la miglior acuità visiva corretta (MAVC) dell'occhio ambliope e dati di stereoacuità prima e dopo le 8 sessioni di formazione dicoptiche. Come mostrato, la MAVC è migliorata significativamente da un valore medio logMAR MAVC di $0,58 \pm 0,35$ prima dell'allenamento a un valore medio post-allenamento di $0,43 \pm 0,38$ (Fig. 6). La MAVC con le E di Snellen dell'occhio ambliope andava prima dell'allenamento dal 20/400 al 20/25 e dal 20/400 al 20/20 dopo l'allenamento (Fig. 6). Un totale del 29,41% dei pazienti e del 47,06% degli occhi ha raggiunto una MAVC di 20/40 o meglio, prima e dopo l'allenamento, rispettivamente (Fig. 7). La maggior parte

dei pazienti ha ottenuto un'aggiunta di linee (in media una linea logMAR di 1,5) di MAVC eccetto quelle con una MAVC più basso (1,30, 1,10 e 0,9 logMAR) e un paziente con 0,30 logMAR di MAVC (Fig. 7). In questi quattro casi, non è stata osservata alcuna variazione di MAVC.

La stereoaucuità è stata misurata usando il test del cerchio graduato Stereo Randot, con la capacità di misurare stereotipi da 400 a 20 s d'arco. La stereoaucuità media è variata da un valore di $263,3 \pm 135,1$ prima dell'allenamento dicoptico a un valore di $176,7 \pm 152,4$ s di arco dopo l'allenamento (Tabella 1) (Fig. 8). Quindi per 8 pazienti (47,1%), prima del trattamento dicoptico, la stereoaucuità non era misurabile, mentre, dopo l'allenamento, ciò avveniva solo per 2 pazienti (11,8%) (Fig. 9).

Soggettivamente, i pazienti non hanno riferito problemi dopo l'allenamento dicoptico. Occasionalmente alcuni pazienti si sono sentiti stanchi dopo l'allenamento e hanno riferito una sensazione di affaticamento dell'occhio ambliope.

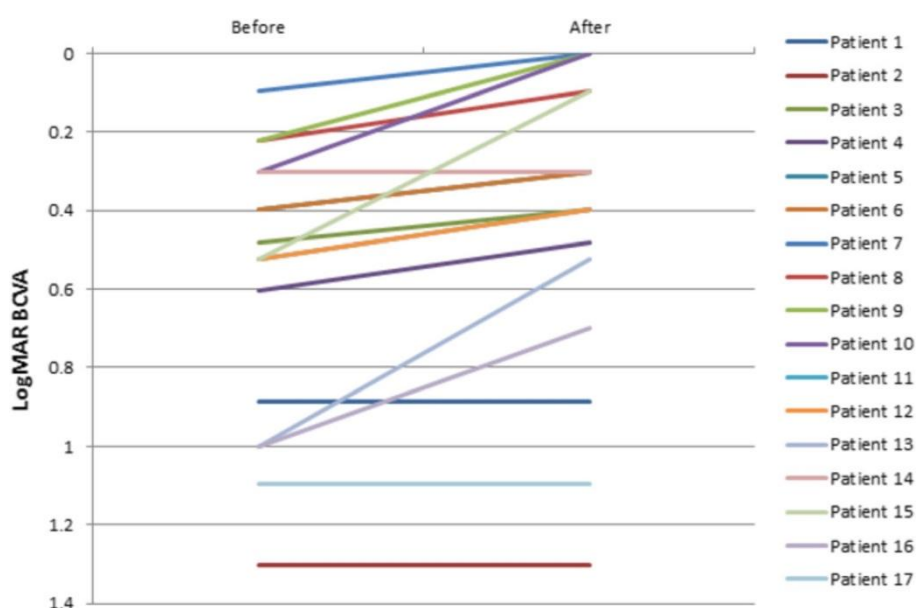


Fig. 6 Modifica della migliore acuità visiva corretta (MAVC) con il trattamento per ciascun paziente valutato

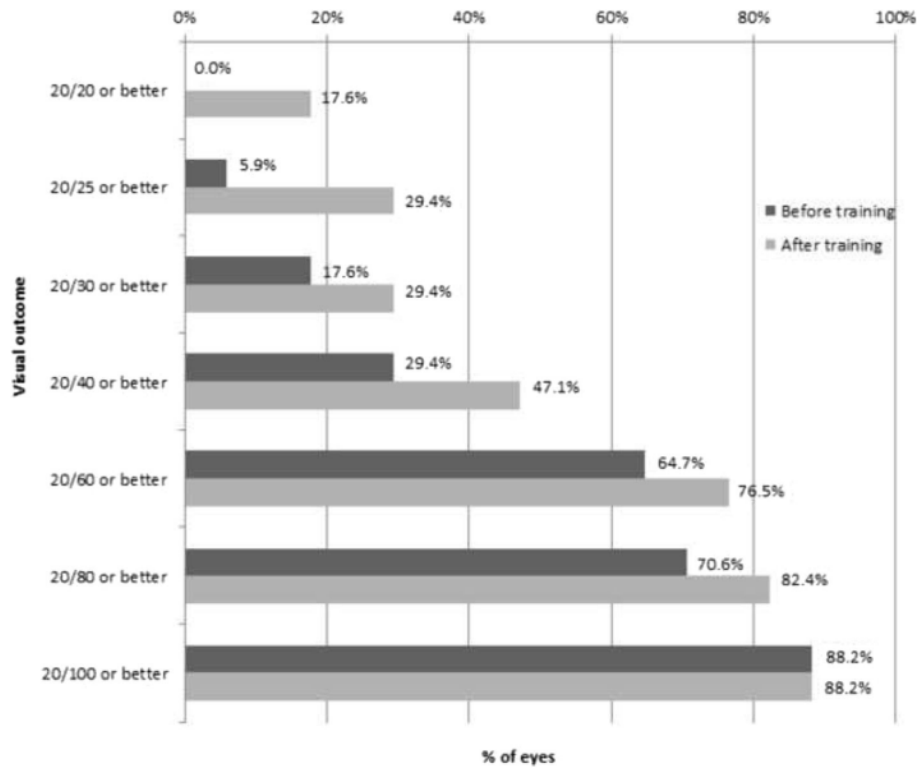


Fig. 7 Distribuzione dei dati di acutezza visiva corretta nel campione analizzato prima e dopo il training visivo

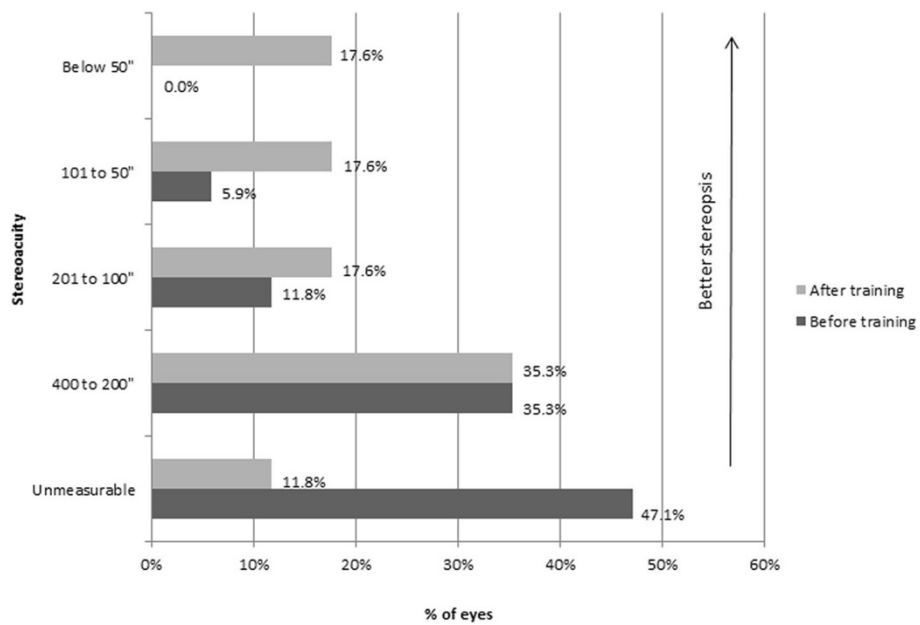


Fig. 8 Cambio in stereoacuità con il trattamento per ciascun paziente valutato

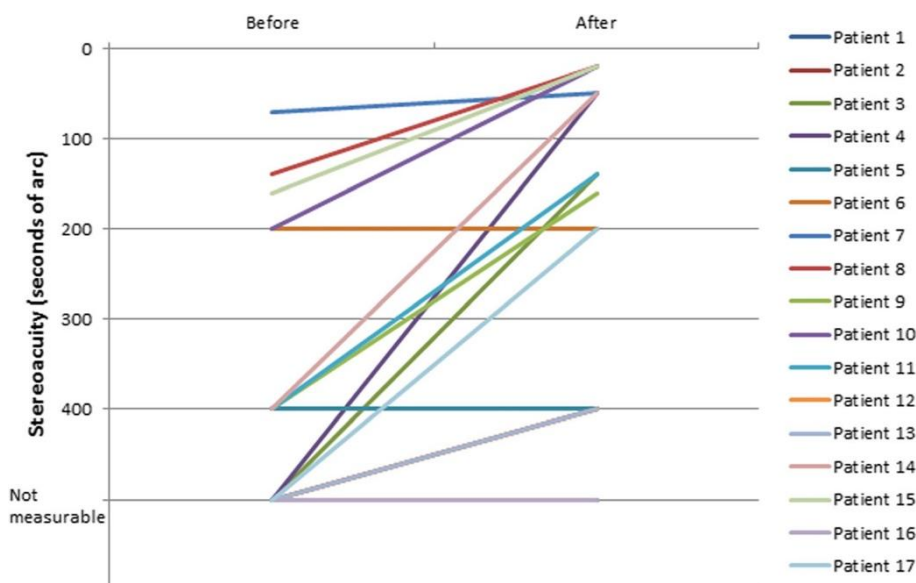


Fig. 9 Distribuzione dei dati di stereoacuità nel campione analizzato prima e dopo l'allenamento visivo

Nei bambini piccoli con ambliopia anisometropica, un periodo di 16-22 settimane di trattamento con correzione ottica è sufficiente nella maggior parte dei casi per superare la soppressione e portare a un miglioramento dell'acuità visiva a 2 o più linee logMar. In quasi un terzo dei bambini ambliopi, il trattamento con correzione ottica è sufficiente per risolvere completamente l'ambliopia. Per i bambini più grandi, l'applicazione di *patch* o di atropina è un trattamento complementare efficace per l'ambliopia. Dopo aver raggiunto un'acuità visiva stabile con l'uso degli occhiali, i bambini più grandi richiedono 120 ore di trattamento per ottenere un miglioramento di 1 linea logMAR. Tuttavia, la visione binoculare gioca un ruolo importante nell'ambliopia e ciò apporta nuovi approcci allo sviluppo di trattamenti più efficaci. Recenti studi dimostrano che l'allenamento binoculare-dicoptico può produrre effetti di apprendimento significativamente maggiori rispetto all'allenamento monoculare. I ricercatori hanno dimostrato che 9 ore di allenamento con film in visione dicoptica per un periodo di 2 settimane hanno prodotto un miglioramento visivo nei bambini (4-10 anni) da 1 a 4 linee logMar. Negli adulti, la prova scientifica dell'efficacia del trattamento dell'ambliopia è scarsa. Nel presente studio, sono stati riportati i risultati di uno studio preliminare che valuta i risultati della formazione visiva dicoptica utilizzando la realtà virtuale montata su un display in adulti con ambliopia anisometropica. In questa serie è stato riscontrato un miglioramento della MAVC di 1,5 linee logMAR in media. Questi risultati sono coerenti con quelli riportati

anche in precedenti studi che valutano gli effetti di altri metodi di allenamento dicoptico. Uno studio recente ha dimostrato che solo 10 ore di videogioco dicoptico hanno migliorato l'acuità visiva di oltre 0,16 logMAR. Spiegel D.P. e colleghi hanno riportato un aumento di 0.34 logMAR in MAVC dopo 10-65 minuti di allenamento con un videogioco dicoptico di Tetris. Al contrario, il videogioco monoculare con *patch* ha dimostrato di migliorare l'acuità visiva negli adulti affetti da ambliopia in media di 1,6 linee logMAR dopo 40 ore di allenamento. L'uso di un allenamento dicoptico può essere quindi più efficace dell'allenamento monoculare nell'ambliopia, ma questo è qualcosa che dovrebbe essere ulteriormente studiato in studi comparativi controllati. In questo studio, la MAVC non è migliorata in tre pazienti. Ciò è coerente con studi precedenti che dimostrano che una percentuale di pazienti ambliopici compresa tra il 10 e il 50% può non riuscire a raggiungere un'acuità visiva normale anche dopo lunghi periodi di trattamento. In particolare, i pazienti più giovani hanno mostrato un aumento della MAVC, suggerendo che una minore plasticità cerebrale potrebbe essere una delle possibili ragioni per l'assenza di miglioramento del MAVC in tre casi. Un'altra ragione potrebbe essere la diminuita funzione dell'innervazione afferita nella materia grigia o bianca del sistema nervoso centrale, come mostrato in precedenti studi di risonanza magnetica. Allo stesso modo, la motivazione dei pazienti, come con altre forme di apprendimento percettivo, può giocare un ruolo significativo sui risultati. Sono necessari studi futuri per determinare le cause reali dell'assenza di miglioramento con il trattamento dicoptico in alcuni pazienti ambliopici. In questo campione, la stereoacuità è migliorata in 7 pazienti su 10, mentre in altri studi la valutazione di altre modalità di trattamento binoculare ha riportato tassi di miglioramento dal 50% al 60%. Probabilmente, l'uso della realtà virtuale potrebbe giocare un ruolo importante in questa stereoacuità potenziata dopo l'allenamento dicoptico con l'Oculus Rift. Fulvio J. e i suoi collaboratori hanno dimostrato che l'head tracking nei display con realtà virtuale riduce la percezione errata del movimento 3D. Sono necessarie ulteriori ricerche su questo argomento per valutare l'utilità potenziale dell'addestramento alla realtà virtuale per il miglioramento della stereopsi nell'ambliopia. I risultati preliminari di questo studio indicano comunque il potenziale per un nuovo trattamento per l'ambliopia in età adulta. È ancora necessario eseguire una sperimentazione clinica controllata che valuti questa potenziale opzione di trattamento per l'ambliopia, non solo negli adulti, ma anche nei bambini. I risultati suggeriscono che la sop-

pressione dell'ambliopia cancelli la plasticità all'interno della corteccia visiva ambliopica dell'adulto e quindi un certo grado di plasticità corticale residua può essere smascherata nel cervello adulto. Va inoltre considerato che gli effetti motivazionali associati ai videogiochi possono giocare anche un ruolo importante nella plasticità neuronale del sistema nervoso centrale. Come indicato precedentemente nell'attuale studio preliminare, viene utilizzato un protocollo di trattamento di 8 sessioni di trattamento durante 1 mese (2 sessioni / settimana). La ragione per la selezione di questo protocollo era basata sulla considerazione che la *compliance* potrebbe essere migliore se il trattamento fosse più breve e anche su precedenti esperienze che dimostrano che l'eccellente miglioramento con l'allenamento percettivo è raggiunto nelle prime otto sessioni di trattamento. Questo studio preliminare però presenta alcune limitazioni, tra cui la dimensione del campione, il breve follow-up e l'assenza di un gruppo di controllo. Tre pazienti sono stati controllati a 6 mesi dal termine del trattamento e tutti avevano un'acuità visiva di 100 s di arco o una MAVC migliore e stabile. Tuttavia, lo scopo di questo studio preliminare era di mostrare la potenziale vitalità del trattamento.

In conclusione, questo studio preliminare mostra la potenziale utilità dell'addestramento dicoptico utilizzando la realtà virtuale montata su un display davanti ai nostri occhi nel trattamento dell'ambliopia anisometropica adulta. Sono necessari però studi clinici futuri per confermare questa prova preliminare e studi che valutano il potenziale beneficio nell'esito della stereopsi dell'uso della realtà virtuale montata su un display sulla nostra testa.¹⁹

3.2 La stereopsi

Durante la nostra percezione binoculare distinguiamo 3 gradi principali, proposti da Worth nel 1915. La stereopsi è il terzo grado mentre il primo è la percezione simultanea seguito alla seconda posizione dalla fusione. L'ordine delle tre capacità è significativo perché se si possiede la fusione si presuppone che ci sia la percezione simultanea e se invece è presente la stereopsi si deduce che ci sia la fusione. Per i primi due gradi viene clinicamente rilevata la presenza o l'assenza, mentre per il terzo viene solitamente indicata anche la quantità. Nella pratica clinica però si verifica inizialmente la presenza della stereopsi perché considerata una prova sufficiente della normale funzione binoculare. Definiamo quindi la stereopsi come la capacità visiva di percepire la profondità dello spazio tramite i meccanismi binoculari, ossia quelli che utilizzano informazioni provenienti dai due occhi.

A causa della diversa posizione lungo l'asse orizzontale dei due occhi, le immagini retiniche di uno stesso oggetto risultano leggermente differenti, pertanto, in condizioni fisiologiche esiste un certo spostamento detto anche disparità retinica binoculare orizzontale tra le due immagini proiettate sulla retina. Ciò nonostante, queste due immagini verranno fuse insieme, a patto che cadano su punti retinici corrispondenti, e la nostra psiche sfrutterà questa disparità per trarre informazioni relative sulla profondità e alla posizione spaziale dell'oggetto. La stereopsi deve essere acquisita nell'infanzia, altrimenti è persa irrimediabilmente. Secondo Gwiazda et al. nel 1989, questa capacità si presenta dai quattro mesi e migliora rapidamente, raggiungendo la normalità a 6-8 anni. Possiamo distinguere due tipi di stereopsi: locale e globale. La stereopsi locale può essere indotta da una coppia di mire simili con margini definiti, spostate orizzontalmente l'una rispetto all'altra, mentre quella globale richiede una percezione più complessa, comprendente anche la valutazione delle qualità di superficie (*textures*), di mire che possono essere prive di caratteristiche monoculari, cioè prive di una forma visibile con un solo occhio.²⁰ Tenendo conto della realtà virtuale la stereopsi che prenderemo in considerazione sarà quella locale perché è il principio di funzionamento di questa tecnologia. La stereopsi a differenza degli altri gradi della visione binoculare si può quantificare e la sua unità di misura viene espressa in secondi d'arco. Affinché la stereopsi si possa manifestare devono essere presenti varie caratteristiche quali: fissazione bifoveale, fusione, sufficiente acuità spaziale e visione simile tra i due occhi.

Circa il 10% della popolazione ha una percezione della profondità stereoscopica anomala (PPS), inclusa la cecità stereoscopica (Richards, 1970). La PPS corretta, richiede la regolazione della soppressione interoculare, l'estrazione della disparità binoculare nonostante il disallineamento binoculare residuo, l'utilizzo della disparità per stimare la profondità e la combinazione con i segnali di profondità monoculare. Lo sviluppo della PPS durante l'infanzia è di conseguenza complicato, ma lasciando spazio alle grandi differenze individuali si presenta l'opportunità di identificare e trattare i collegamenti deboli che possono essere sufficienti per recuperare la PPS, o almeno permettere al sistema di migliorare attraverso l'apprendimento percettivo. Possiamo quindi descrivere un ambiente di lavoro flessibile che utilizza la realtà virtuale (VR) per il trattamento clinico supplementare delle anomalie della visione binoculare. Questo strumento ha lo scopo di migliorare il trattamento e rendere gli studi clinici più facili da condurre e interpretare in futuro. Trattamenti riabilitativi di ogni tipo richiedono un alto grado di motivazione e impegno. Worth (1906) descrive l'importanza dell'impegno del paziente per quanto riguarda le terapie riabilitative visive: "il paziente, quindi, svolgerà solo gli esercizi finché li troverà interessanti." Dato che le persone sono in grado di vivere senza la visione stereoscopica, bisogna trovare un modo per motivare i pazienti a migliorare la propria binocularità. Ci deve essere un beneficio per il paziente per ottenere una visione stereoscopica, e il paziente deve essere impegnato e preoccuparsi per il risultato del processo riabilitativo. Più recentemente, Barry e Bridgeman (2017) hanno intervistato 63 individui che hanno recuperato la stereopsi nell'età adulta. Questi individui hanno descritto la visione stereoscopica come "miracolosa", "incredibile", "scioccante" e persino "che cambia la vita".

Con "Apprendimento percettivo" ci si riferisce a un particolare tipo di allenamento che implica la ripetizione di un compito con l'obiettivo che il miglioramento delle capacità si estenda ad altre abilità oltre il compito specifico. I principi percettivi di apprendimento possono essere usati nelle attività di riabilitazione visiva. Le attività possono richiedere al paziente di utilizzare insieme entrambi gli occhi allo scopo di migliorare l'acuità visiva, riequilibrare l'ingresso binoculare attraverso i due occhi o migliorare la visione stereoscopica. Ding e Levi (2011) hanno riferito di un piccolo gruppo di individui stereoisufficienti che hanno recuperato la visione stereoscopica seguendo un compito di apprendimento percettivo che utilizzava obiettivi monoculari e stereoscopici. Dopo l'al-

lenamento, i pazienti adulti hanno mostrato un significativo recupero della stereopsi e hanno riportato la capacità di vedere in profondità e apprezzare i film 3D. L'apprendimento percettivo può avvenire anche in contesti naturali. Uno studio recente ha riportato che le sarte dimostrano una migliore visione stereoscopica rispetto ai non-sarti. È probabile che la ripetizione di compiti semplici, come il cucito, fornisca al sistema visivo una forma di apprendimento percettivo (Chopin, Levi, & Bavelier, 2017). Tuttavia, i pazienti con stereosufficienza probabilmente rispondono meglio a compiti mirati di riabilitazione visiva che si concentrano direttamente sull'allenamento stereo, rispetto ad altre tecniche o esperienze riabilitative. (Levi, Knill e Bavelier, 2015).

La riabilitazione visiva utilizzando la realtà virtuale si è concentrata principalmente sul miglioramento delle capacità visive, in particolare l'acuità visiva nei pazienti con ambliopia. Tuttavia la percezione della profondità stereoscopica anomala viene spesso misurata come obiettivo secondario negli studi sull'ambliopia. La VR offre una piattaforma unica per l'allenamento diretto della stereopsi. La ricercatrice I.Vedamurthy e colleghi hanno usato una miscela di segnali monoculari e binoculari che hanno adattato la presentazione delle immagini ai soggetti in un gioco per la realtà virtuale. I soggetti sono stati incaricati di schiacciare un insetto virtuale presentato in modo dicopticale con un cilindro di plexiglass su una superficie inclinata. (Fig. 10)

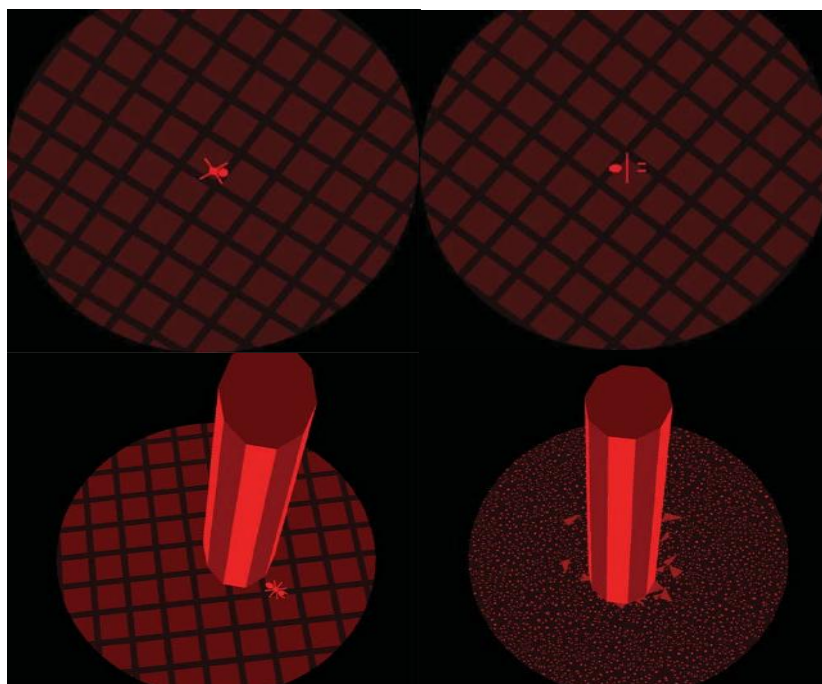


Fig. 10 Insetto digitate visibile diversamente dai due occhi, e un cilindro di plexiglass digitale con il quale bisogna schiacciare l'insetto.

Il gioco ha adattato il livello dei segnali monoculari o binoculari presentati al soggetto sulla base di risposte corrette o errate. Dopo l'allenamento, la maggior parte dei soggetti mostrava miglioramenti in stereoacuità (Vedamurthy et al, 2016).

Le terapie per la VR possono implementare i metodi già esistenti nella storia della terapia della vista per migliorare la PPS nei pazienti, rendendo i trattamenti più interessanti e divertenti. Inoltre, il controllo computerizzato del trattamento in VR consentirà una maggiore coerenza della terapia tra i pazienti, il che renderà più fattibile studiare l'efficacia e renderà possibile per un singolo optometrista trattare molti più pazienti.

Dalla pratica clinica, sappiamo che la visione binoculare e la PPS in particolare sono complesse. Consideriamo i vari sottosistemi che devono essere tutti funzionanti correttamente affinché la PPS si verifichi. Innanzitutto, gli occhi devono essere correttamente allineati fisicamente. In un sistema di visione artificiale, due videocamere possono essere impostate per riprendere oggetti predefiniti frontali, le cui immagini verranno identificate dal software. Le disparità binoculari (cambio di posizione da un'immagine all'altra) di oggetti nello spazio possono quindi essere misurate in pixel, indipendentemente dal fatto che la disparità sia grande o piccola. Il sistema visivo umano è diverso. Il cablaggio neurale che misura la disparità binoculare negli esseri umani funziona su una gamma più piccola di disparità. Soprattutto per piccole disparità, il sistema visivo richiede che gli oggetti misurati per disparità cadano su due punti retinici corrispondenti. Se l'oggetto cade sulla fovea in un occhio, deve cadere sulla fovea o vicino nell'altro occhio; non deve cadere nella visione periferica. Pertanto, il sistema visivo umano è progettato come un sistema convergente: l'angolo di convergenza tra i due occhi deve essere corretto in modo da mettere le due immagini di un oggetto sulle corrispondenti posizioni delle due retine. La capacità di allineare fisicamente gli occhi è detta fusione motoria, mentre la capacità di abbinare le immagini, attraverso piccole differenze residue nella posizione retinica, è chiamata fusione sensoriale. Una persona con strabismo ha scarsa fusione motoria: non riesce a far allineare gli occhi fisicamente. In alcuni casi è sufficiente, per il recupero della PPS in una persona con stereoinsufficienza, raggiungere l'allineamento fisico degli occhi. Questo allineamento può essere eseguito attraverso la chirurgia del muscolo oculare, l'uso di prismi (che muovono gli stimoli visivi verso gli occhi puntati piuttosto che muovere gli occhi) o la terapia della visione. In altri casi, però, il cervello non supporterà la fusione sensoriale anche quando l'immagine dell'og-

getto cade sulle corrispondenti posizioni retiniche nei due occhi. Ad esempio, molte persone con strabismo hanno anche soppressione cronica di un occhio o soppressione alternata. Durante la soppressione, il cervello seleziona un occhio per vedere e l'input dell'altro occhio nella corteccia visiva viene notevolmente ridotto; senza input da entrambi gli occhi nei siti di combinazione binoculare, la fusione sensoriale è impossibile. Ciò nonostante anche la fusione sensoriale non è sufficiente per la PPS, poiché le disparità binoculari devono essere misurate ed estratte dalle immagini.

Il sistema utilizzato nel progetto intitolato “*Use of virtual reality to assess and treat weakness in human stereoscopic vision*” (San Francisco, California, USA 2018) è il Vivid Vision System che utilizza hardware per la realtà virtuale, un computer con capacità VR e un software VR progettato su misura per offrire giochi coinvolgenti e controlli gestuali per la riabilitazione visiva. L'obiettivo nel fornire giochi diversi è duplice, per mantenere il giocatore impegnato fornendo una varietà di esperienze e per fornire attività che richiedono diverse abilità visive. Alcuni giochi contengono elementi monocolarmente visibili, per cui è necessaria la fusione sensoriale per eseguire l'operazione. Ad esempio, nel gioco Breaker (Fig. 11),

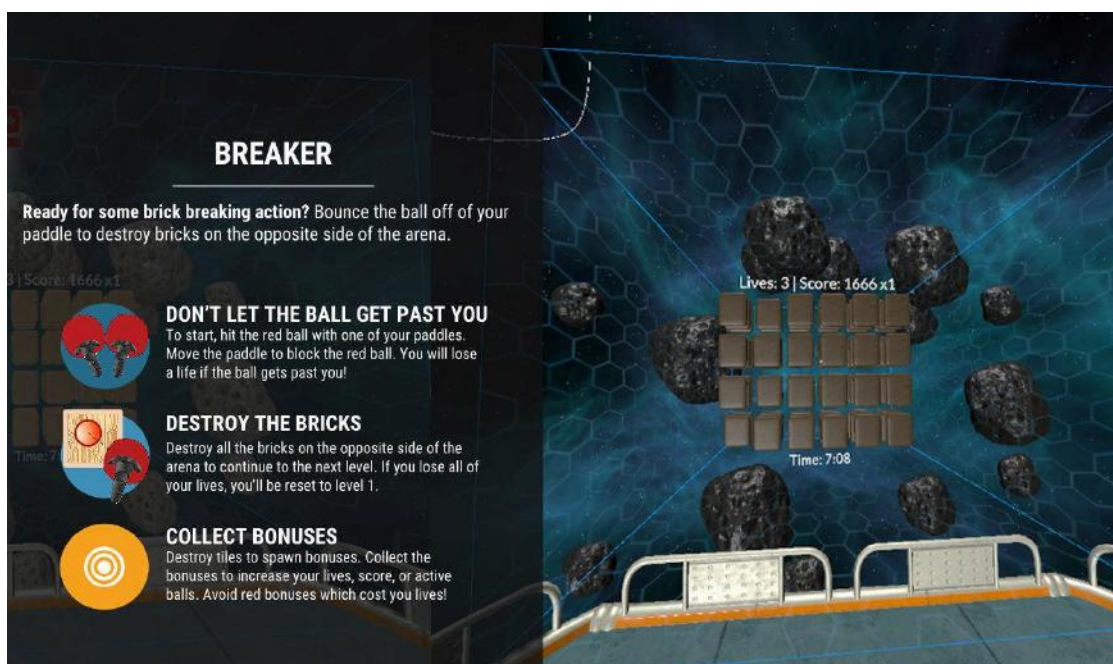


Fig. 11 Pagina del manuale utente per i giocatori a casa, del gioco Breaker.

Il paziente colpisce i mattoni bersaglio usando una palla e una paletta mobile, in una variante 3D del classico gioco Atari Breakout. Tipicamente, la palla verrebbe mostrata solo all'occhio che il paziente normalmente sopprime, mentre i *paddle* sono mostrati

all'altro occhio ("dominante"). Per colpire la palla con la paletta il paziente deve fondere le immagini dei due occhi, in modo che entrambi gli oggetti siano visibili simultaneamente. Pertanto, Breaker mira alla fusione sensoriale. La PPS rende l'esperienza più tridimensionale, ma non è necessario avere la PPS per giocare.

Al contrario, in Bubbles la PPS è necessaria per svolgere il compito. (Fig. 12),

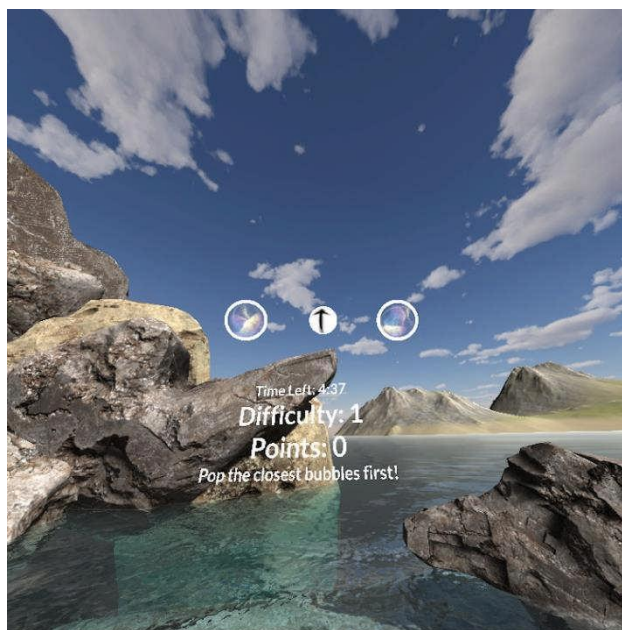


Fig. 12 Immagine vista dal giocatore nel gioco Bubbles. In questo gioco il giocatore usa un gamepad o mani virtuali per toccare la bolla più vicina. Per evitare che le dimensioni relative diventino un indicatore di distanza, le bolle sono regolate in dimensioni 3D per sottendere la stessa angolazione visiva. È quindi impossibile eseguire sopra i livelli di probabilità usando un solo occhio; PPS è essenziale per svolgere il compito

Da 2 a 12 le bolle bersaglio sono disposte attorno a un segnalino centrale, e il giocatore deve scoppiarle con la mano, iniziando dalla bolla più vicina e procedendo verso il punto più lontano fino a quando tutte le bolle non vengono scoppiate. La matrice di bolle può essere fissata alla testa per impedire che la parallasse di movimento diventi un'indicazione di profondità e le dimensioni delle bolle possono essere fissate in modo che quest'ultime sottostiano allo stesso angolo visivo, evitando che le dimensioni relative diventino un indicatore di profondità. Quindi, con "Bubbles" si stabilisce l'utilizzo della disparità per vedere la profondità. Altri giochi e attività mantengono la fusione motoria, favorendo l'integrazione di molteplici spunti di profondità, enfatizzando l'uso della disparità per controllare i movimenti delle mani, richiedendo risposte veloci e usando la lucentezza binoculare, l'attenzione al campo visivo periferico, il controllo della postura dell'occhio di vergenza, e pratica dell'acuità (fino alla risoluzione spaziale HMD di circa

6 cicli per grado). I giochi possono anche essere eseguiti utilizzando parametri globali specifici del paziente per il rapporto di luminanza/contrasto interoculare (RLCI), per contribuire a ridurre la soppressione interoculare durante il gioco; la sfocatura, per ridurre selettivamente l'energia di contrasto ad alte frequenze spaziali nel dominante; l'offset del prisma, che sposta le immagini in direzioni opposte, per compensare il disallineamento binoculare; e la dimensione dell'oggetto, che può essere aumentata per migliorare la visibilità nell'occhio ambliope. Ridurre la luminanza può essere efficace quanto ridurre il contrasto quando si penalizza l'occhio più forte per migliorare l'equilibrio interoculare (Ding and Levi 2014). I parametri RLCI e il prisma possono essere impostati dall'optometrista prima del gioco, sulla base di test separati svolti in studio da quest'ultimo. Il professionista cercherà in genere di adattare questi parametri ai valori nulli e bilanciati nel corso del trattamento. I test in-game consentono all'optometrista di monitorare la dominanza degli occhi, la foria, la stereoacuità, l'acuità (utilizzando un inserto ottico che riduce lo schermo) e la vergenza (fusione motoria).

Un recente articolo di opinione ha sollevato la questione della sicurezza (Mon-Williams, 2017). In particolare, le dinamiche ottiche in VR non sono perfette, quindi il sistema visivo dell'utente deve lavorare e presumibilmente adattarsi a questo input imperfetto e innaturale. Inoltre, la maggior parte degli HMD ha una domanda accomodativa fissa: per vedere chiaramente lo schermo, l'utente deve usare delle lenti positive in modo da vedere nitido ad una distanza costante di circa 1,5 cm. Il sistema viene utilizzato sotto la cura di un professionista della vista, che può monitorare l'affaticamento degli occhi e interrompere l'uso se necessario. Forse ancora più importante, tuttavia, è una componente di vecchia data della terapia della visione cioè dissociare intenzionalmente accomodazione e convergenza. In molti pazienti, l'accomodazione e la convergenza sono accoppiati molto fortemente l'uno con l'altro, ma con errori sistematici. Questa risposta accomodativa per ottenere la messa a fuoco può causare la convergenza degli occhi, causando una visione doppia. Sviluppare una maggiore flessibilità nella relazione tra accomodazione e convergenza è quindi un obiettivo attivo nella terapia della visione.

L'uso della realtà virtuale nei sistemi commerciali consentirà di realizzare una serie di nuovi vantaggi. I dati dei pazienti possono essere raccolti e aggregati su Internet; i pazienti possono valutare le proprie capacità di visione binoculare utilizzando applicazioni fornite sul web, che possono suggerire quando una visita di un optometrista può essere

giustificata nel caso in cui si sospettino ambliopia, strabismo, insufficienza di convergenza o mancanza di PPS. Il rilevamento degli occhi è stato incorporato in una nuova generazione di HMD e questa capacità dovrebbe essere utile per valutare la velocità e la precisione dei movimenti oculari per la fusione motoria.

La deficienza della percezione della profondità stereoscopica è tipicamente un problema del sistema nervoso centrale, a differenza di molti altri disturbi che influenzano la capacità visiva, che hanno origine nell'occhio, come la mancanza della visione dei colori. Il cervello sopprime l'input da un occhio, o non può combinare gli input in un'immagine fusa, o non può utilizzare le differenze di immagine (disparità) per controllare i movimenti oculari di vergenza o per costruire profondità apparenti all'interno delle percezioni visive. La realtà virtuale è ideale per fornire al cervello stimoli visivi speciali per compiti e formazione mirati alle specifiche abilità visive che causano la mancanza di PPS nell'individuo. Il valore di PPS nelle situazioni del mondo reale non è ancora ben definito. Le persone che acquisiscono PPS in età adulta hanno fornito resoconti in prima persona della sua utilità (Barry & Bridgeman, 2017). In ogni caso, il ricco mondo delle esperienze 3D diventerà probabilmente accessibile a un numero maggiore di persone attraverso l'uso di trattamenti basati sulla realtà virtuale.²¹

3.3 L'insufficienza di convergenza

La convergenza è l'abilità del nostro sistema visivo di puntare gli occhi verso l'interno per fissare gli oggetti molto vicini. L'insufficienza di convergenza è l'incapacità dei nostri occhi di convergere adeguatamente a distanza ravvicinata specialmente durante i lunghi periodi di lettura o di studio. Nello specifico l'insufficienza di convergenza (IC) consiste in un punto di convergenza prossimale (PPC), esoforia a distanza ravvicinata, vergenza fusionale positiva ridotta (VFP) e carenza di accomodazione relativa negativa (ARN). Tuttavia, non tutti i pazienti con IC hanno tutti questi risultati clinici. L'IC può essere descritto come una carenza di VFP rispetto alla domanda e/o una carenza di convergenza totale, misurata dall'PPC. L'eziologia dell'IC è controversa. Probabilmente deriva da una rottura della relazione accomodazione-convergenza. È probabile che esista una predisposizione genetica per l'IC. I sintomi tendono a verificarsi quando le persone usano i loro occhi in un ambiente di lettura bidimensionale per lunghi periodi di tempo. I sintomi tendono ad aumentare durante l'adolescenza e continuano ad aumentare durante i primi vent'anni di età. I sintomi si verificano comunemente con l'uso del computer o in un ambiente di lavoro visivamente impegnativo. Tipicamente, essi non soddisfano il criterio di Sheard (vale a dire, una riserva di vergenza fusionale che sia almeno il doppio dell'entità dell'eteroforia). Molti pazienti con IC hanno una scarsa facilità accomodativa. In alcuni casi, l'errore di configurazione risulta dall'incapacità del sistema accomodativo di adattarsi con precisione alle distanze ravvicinate.²²

OculoMotor Technologies (OMT) è un'azienda di dispositivi medici avviata al New Jersey Institute of Technology, sviluppatrice di un programma software proprietario, denominato Virtual Eye Rotation Vision Exercises (VERVE), dell'esperienza di terapia della visione, una nuova combinazione di elettronica con principi tradizionali per la terapia della vista. (Fig. 13)

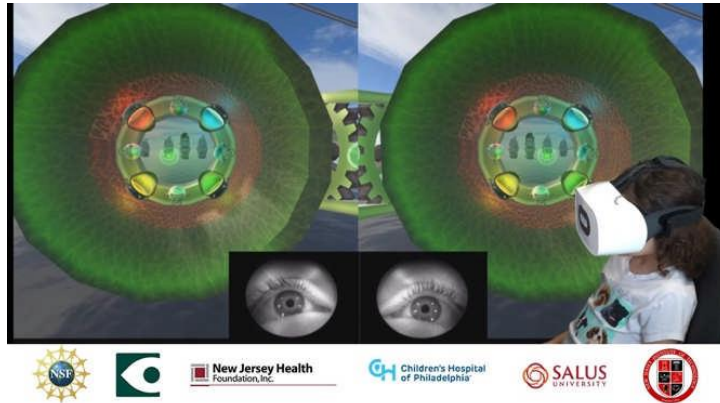


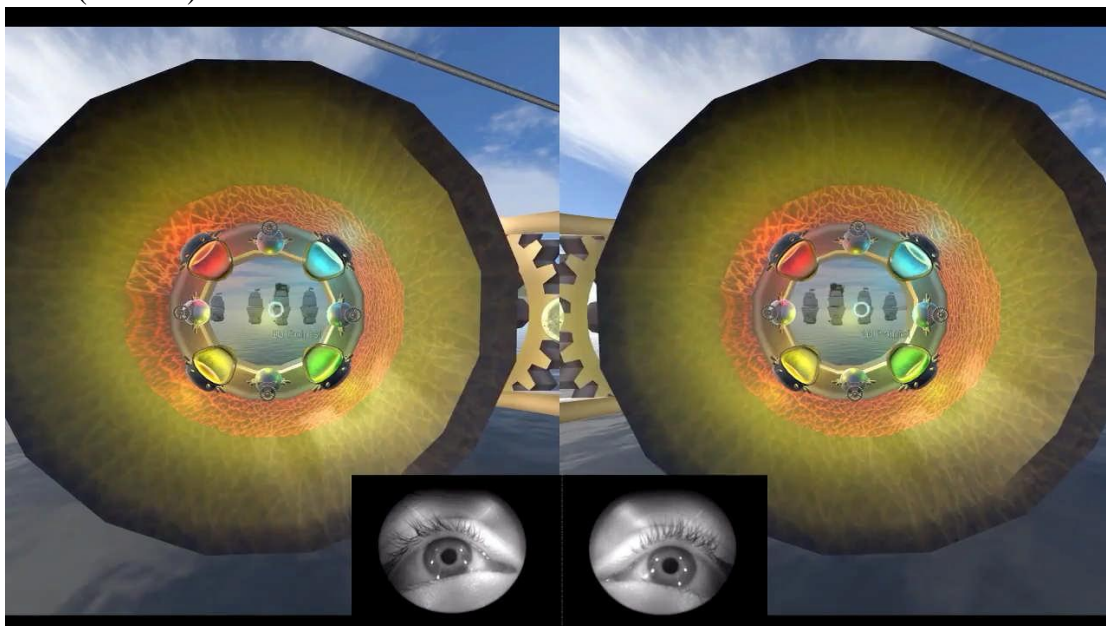
Fig.13 Software VERVE per la terapia della visione.

VERVE è progettato per il trattamento di un disturbo della vista noto come insufficienza di convergenza (IC), che colpisce almeno il 5% della popolazione generale e oltre il 50% della popolazione che ha subito un trauma/commozione cerebrale. La IC causa sintomi quali visione doppia, visione offuscata, mal di testa, vertigini e nausea, quando si esegue un lavoro da vicino: attività quotidiane che si verificano vicino al viso, come leggere un libro o guardare lo schermo di un computer. Sebbene non sia una condizione pericolosa per la vita, l'IC ha un impatto significativo sulla qualità della vita sia nei pazienti pediatrici che in quelli adulti. Fortunatamente per i pazienti con IC, questo disturbo della vista è altamente curabile, come dimostrato dal lavoro del dott. Mitchell Scheiman il quale ha condotto il più grande studio clinico randomizzato mai presentato sulla terapia con IC e ha dimostrato che la terapia con un optometrista in studio risolverà i sintomi in oltre il 75% dei pazienti. Tuttavia, ha anche scoperto che i pazienti arruolati in un protocollo di terapia computerizzata domiciliare hanno mostrato tassi di rimedio solo del 33%. E hanno notato che solo il 67% di questi pazienti era conforme al programma di terapia. Nell'aprile 2015, la terapia di visione della realtà virtuale è stata ufficialmente avviata con un progetto di ricerca dove si voleva progettare un videogioco terapeutico, riproducibile in un *headset* per realtà virtuale, che potesse cambiare la difficoltà in base ai movimenti degli occhi dell'utente. Successivamente d'Antonio-Bertagnolli ha messo insieme un sistema composto da un Oculus DK2, un paio di Raspberry Pis, LED a infrarossi creando così il progetto DK2. (Fig. 14)



Fig. 14 Il soggetto (a sinistra) indossa il prototipo di auricolare VR per il tracciamento degli occhi disegnato da d'Antonio-Bertagnoli (a destra) mentre calibra le telecamere per il rilevamento degli occhi.

Quelle idee di software erano un miscuglio di un algoritmo personalizzato di eye tracking e vari prototipi di gioco. I molteplici giochi sono stati progettati pensando alla terapia, incorporando stimoli visivi e modelli che sono stati ipotizzati per suscitare risposte terapeutiche nei pazienti. Grazie a VERVE, con la sua meccanica di gameplay principale sono riusciti a simulare un comune esercizio di terapia della vista, in cui un bersaglio visivo che viene spostato lentamente verso il viso del paziente. Simultaneamente, l'ambiente di gioco ricrea l'effetto dei prismi abitualmente utilizzati nella terapia della vista. (Video 1)



Video 1 Filmati di gioco del software VERVE

Il risultato finale è un gioco che ha costretto gli occhi del giocatore a incrociare e disin-crociare ripetutamente. Questo è un meccanismo fondamentale di terapia della visione per l'IC. Alla fine di ogni movimento terapeutico, i giocatori hanno ordinato il bersaglio visivo per colore in un globo di corrispondenza, guadagnando punti lungo la strada e usando i loro occhi per effettuare la selezione. Nessun controller di gioco è utilizzato nell'intero gioco ma vengono eseguiti solo i movimenti di entrambi gli occhi.²³

I pazienti con insufficienza sintomatica di convergenza (IC) riportano di routine, i sintomi della vista che possono includere uno o più dei seguenti segni: visione doppia e offuscata, tensione intorno agli occhi, mal di testa, affaticamento degli occhi, fluttuazione del testo durante la lettura, lettura lenta o dover rileggere testo. Circa il 4% -8% della popolazione generale e quasi la metà dei pazienti con sindrome post-concussiva (trauma cranico) hanno una IC sintomatica che ha un impatto negativo sulla qualità della vita. È stato riportato che la terapia della visione risolve con successo questi sintomi almeno per un anno dopo il trattamento.

Gli studi clinici randomizzati riportano che mentre la vergenza in studio e la terapia accomodativa sono efficaci al 73% nel trattamento dei sintomi della vista in pazienti neurologicamente normali, le terapie domiciliari non sono sostanzialmente migliori della terapia fittizia, probabilmente a causa della scarsa compliance. Quindi, sono necessarie tecniche innovative e più coinvolgenti per progettare una soluzione domiciliare che sia altrettanto efficace della terapia di visione in studio.

Nello studio “Virtual Reality Vision Therapy VERVE” By OculoMotor Technologies” (Oct 9, 2018) sono stati presi nove pazienti con IC sintomatica e hanno partecipato a 12 sessioni di terapia della visione in realtà virtuale di un'ora e sono stati riesaminati dopo la terapia da un esaminatore anonimo. I risultati di queste misure includevano il punto di convergenza prossimale (PPC), la vergenza fusionale positiva (VFP) e la *Convergence Insufficiency Symptom Survey* (CISS). La terapia della vista è stata eseguita in un ambiente da ufficio utilizzando il programma denominato Virtual Eye Rotation Vision Exercises (VERVE). VERVE utilizza hardware disponibile in commercio (un computer portatile per giochi e uno schermo montato su realtà virtuale) integrato con il tracciamento degli occhi e software di videogiochi personalizzati per realtà virtuale. VERVE modifica la domanda di convergenza angolare e la quantità di convergenza sostenuta

utilizzando *script* programmabili personalizzati che aumentano di difficoltà man mano che le sessioni procedono.

Sono stati osservati miglioramenti statisticamente significativi utilizzando un t-test appaiato per PPC (prima = 10,4 + 3,1 cm, dopo = 5,3 + 2,2 cm; p = 0,005), VFP (prima = 14,7 + 3,2 pd; dopo = 25,1 + 11,4 pd; p = 0,03) e CISS (prima = 35,6 + 6; dopo = 19,9 + 6; p = 0,001). Tutti i soggetti erano meno sintomatici dopo aver preso parte a VERVE e il punteggio CISS medio è sceso al di sotto di 21, che è considerato il limite per i pazienti sintomatici giovani adulti con IC.

Questi dati pilota suggeriscono che il software di terapia di visione VERVE si è dimostrato promettente come metodo di trattamento per ridurre i sintomi e migliorare il punto prossimo di convergenza e le vergenze fusionali positive nei giovani adulti con IC sintomatica. È necessario uno studio su scala più ampia con un gruppo placebo sia per gli adulti che per i bambini e sono necessarie ricerche per determinare se l'uso di un formato di videogioco migliorerà la compliance quando VERVE è usato come opzione di trattamento domiciliare.²⁴

4. Limiti e controindicazioni della realtà virtuale

Anche se la realtà virtuale può essere messa al servizio dell'optometria, in quanto può apportare vari vantaggi rispetto ai test e agli strumenti meccanici già in uso, bisogna considerare che questa tecnologia presenta comunque alcuni limiti. Il più rilevante dei quali è il costo della strumentazione, non tanto di quella che può essere utilizzata a domicilio per gli allenamenti visto che si trovano ormai sul mercato visori ad un prezzo accessibile di circa 30-40 euro, ma della strumentazione e i macchinari necessari per svolgere le sedute in studio che hanno un costo nettamente superiore a differenza dei classici test svolti per il visual training. Tant'è vero che molti di questi test classici possono essere costruiti a mano con semplici oggetti di uso quotidiano a differenza della realtà virtuale che necessita di display digitale e di software per lo svolgimento degli esercizi. Un altro limite che viene riscontrato nella realtà virtuale è un disturbo neurologico che alcuni individui provano in seguito a degli spostamenti ritmici o irregolari del corpo in movimento definito cinetosi.

4.1 La cinetosi

Chi si confronta con un contesto di realtà virtuale per la prima volta, spesso si scopre improvvisamente vulnerabile a un problema che non aveva mai sperimentato prima: la cinetosi in inglese *motion sickness* (letteralmente: malattia del movimento). Anche tra coloro che di solito non soffrono mal di mare, mal di macchina o mal d'aereo, infatti, è molto comune avvertire sintomi come nausea, giramenti di testa e disorientamento non appena si indossa un qualsiasi visore. Gli effetti collaterali aumentano ulteriormente se l'ambiente VR è applicato a un videogioco che richiede di muoversi nello spazio o di compiere azioni improvvise. Il problema nasce in quanto i nostri occhi registrano che ci stiamo spostando nello spazio, ma in realtà siamo fermi, perciò l'orecchio interno non percepisce nessun movimento e il cervello non riesce a registrare correttamente l'informazione.²⁵ L'analisi del movimento nello spazio non dipende unicamente dalla vista e dall'orecchio interno (o più precisamente dal sistema vestibolare), ma si basa anche su altri due fattori: il cervello e la propriocezione. In realtà gli ultimi due fattori non sono propriamente responsabili né del mal d'auto né del mal da VR ma entrano comunque in gioco. In breve è più uno scontro diretto tra l'orecchio interno e la vista. Il cervello, perdendosi in questa miriade di informazioni contraddittorie, capisce che c'è qualcosa che non va e pensa che ci stiamo ammalando. La sola spiegazione per lui è che uno dei nostri "sensori" è guasto dato che invia delle informazioni sbagliate. Il nostro sistema nervoso agisce quindi come se nel nostro corpo fosse presente un veleno o una neurotossina che induce il vomito. Quindi se siamo immobili ma in pieno movimento durante il gioco, occhi e sistema vestibolare entrano in conflitto.²⁶

Quindi è un complesso fenomeno sia fisiologico sia psicologico che pur essendo legato alla percezione del movimento non presenta un'evidente relazione tra moto e grado di malessere. Numerosi sono i fattori che possono essere collegati alla cinetosi, ma i principali sono le accelerazioni che sono percepite dal sistema vestibolare, visivo e propriocettivo. I sintomi correlati alla cinetosi riguardano differenti aree target:

- visiva (visione sfuocata, diplopia, lacrimazione, arrossamento irritativo);
- uditive (acufene e ipoacusia);
- vestibolare (instabilità, nausea, vomito e sudorazione);
- sistema nervoso centrale (cefalea, convulsioni, flashback e instabilità);

- muscolo – scheletrica (dolori al collo, polsi e schiena).²⁷

Per questo motivo alcuni medici suggeriscono grande cautela nell'uso della VR quando questi strumenti sono usati su pazienti con ipertensione, malattie cardiovascolari e circolatorie. Inoltre, dato che la realtà virtuale può interferire con i normali processi psicologici, un'attenta osservazione è necessaria quando si usa tale espediente tecnologico con pazienti schizofrenici, psicotici e altri disturbi psicopatologici, giacché la confusione del reale versus e il virtuale potrebbe accentuare la loro patologia.

Nei casi più gravi di cinetosi e comunque in base alle situazioni, possono essere prescritti dei medicinali (Tanganil o Betaistina) che permettono di curare la sensazione di vertigini, ovvero risolvono il problema dell'equilibrio agendo sull'orecchio interno. Questi rimedi hanno però degli effetti collaterali ovvero causano sonnolenza, una condizione non proprio ideale per lavorare con la VR. Un altro metodo utilizzato per ridurre la sensazione di nausea è un braccialetto che invia, indicando il grado di malessere percepito, un segnale, sotto forma di piccola scarica elettrica, al cervello che si occuperà di conseguenza di combattere la nausea.²⁸

Per superare queste problematiche e permettere alla maggior parte delle persone interessate ad utilizzare la realtà virtuale è stato creato un sistema adattabile a qualsiasi videogame in grado di ridurre drasticamente il mal di VR. In pratica, l'utente può ridurre o aumentare l'intensità della propria esperienza, lavorando su diversi aspetti: campo visivo periferico, velocità, durata di gioco. Tramite queste variabili, in ogni momento si può rallentare il ritmo o aumentarlo, in modo da abituarsi gradualmente alla situazione.²⁹

Conclusioni

Da queste ricerche quindi, svolte negli ultimi 3-4 anni, sono stati ricavati dei risultati promettenti che mostrano la potenzialità dell'uso della realtà virtuale nel campo del visual training per trattare le disfunzioni oculari, infatti sono stati riscontrati notevoli miglioramenti della visione nei pazienti testati con difetti visivi quali ambliopia, stereopsi e insufficienza di convergenza.

Essendo però dei test preliminari, riportano diversi svantaggi, come la dimensione del campione dove sono stati presi circa solo una decina di persone per test mentre bisognerebbe eseguirli su una scala più ampia di pazienti per ottenere dei risultati concreti. Un altro problema è dato dalla mancanza di follow-up e di un gruppo di controllo, necessari per la verifica nel tempo dei risultati ottenuti.

Tranne queste note negative il resto dei dati ci garantiscono che la realtà virtuale ha un'enorme potenzialità nel visual training.

La realtà virtuale permette semplicità e comodità d'uso degli strumenti da indossare e test facili e ricreativi da eseguire che possono motivare ancora di più il soggetto a svolgerli, specialmente nel caso di bambini o ragazzi che tramite il gioco virtuale possono essere intrattenuti e stimolati ad allenare il proprio sistema visivo in modo divertente.

Tutti i dati dei pazienti inoltre possono essere raccolti e aggregati su internet per una valutazione più ampia dei risultati ottenendo così casistiche sugli esiti ottenuti nell'utilizzo di una particolare strumentazione o software.

Tramite il mondo del web inoltre, viene data la possibilità alle persone interessate, di poter valutare le proprie capacità di visione binoculare tramite delle applicazioni che, in caso di sospetta ambliopia, strabismo o insufficienza di convergenza possono suggerire al soggetto utilizzatore di rivolgersi ad un'optometrista per una visita di controllo mirata. Infatti questi software, non possono in alcun modo sostituire la figura dell'optometrista, alla cui professionalità viene demandata la scelta dell'approccio più adeguato in base al paziente, sia in campo di diagnosi che di trattamento.

La tecnologia quindi può essere utilizzata per integrare gli strumenti e i test attuali per l'optometria come metodo di rieducazione delle funzionalità visive. Nello specifico del visual training la realtà virtuale si è dimostrata di poter essere un efficace supplemento alle tecniche utilizzate fino ad oggi.

Bibliografia e sitografia

1. “La visione binoculare” <http://www.vargellini.it/zaccagnini/download/privatisti%201&2/dispense%20esterne%20IBZ/5.%20LA%20VISIONE%20BINOCULARE.pdf> consultato il 16/08/2019
2. “Efficacy of vision therapy in children with learning disability and associated binocular vision anomalies” <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5777927/> consultato il 16/08/2019
3. “The effect of sports vision training on binocular vision function in female university athletes” <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4723179/> consultato il 20/08/2019
4. “The effect of sports vision training on binocular vision function in female university athletes” <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4723179/> consultato il 20/08/2019
5. “The effect of sports vision training on binocular vision function in female university athletes” <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4723179/> consultato il 20/08/2019
6. Formenti M. (2008) “Vision training”, Ottica e Optometria, Università degli studi di Padova
7. “Le basi neurofisiologiche del visual training” https://www.neuroscienze.net/wp-content/uploads/2012/06/Visual_Training_Ibrahimi.pdf consultato il 19/08/2019
8. “Visual training, la vision aumentata sotto la lente di ingrandimento” 22/09/2016) <https://www.epochtimes.it/news/visual-training-nuova-frontiera-dellallenamento/> consultato il 14/08/2019
9. Formenti M (2008) “Vision training”, Ottica e Optometria, Università degli studi di Padova
10. “Cos’è la realtà virtuale” (n.d.) <http://www.intelligenzaartificiale.it/realta-virtuale/> consultato il 04/05/2019
11. C.Ghidotti, “Realtà virtuale, sogno ad occhi aperti”, <https://www.webnews.it/speciale/realta-virtuale/> consultato il 03/05/2019
12. “Cos’è la realtà virtuale” (n.d.) <http://www.intelligenzaartificiale.it/realta-virtuale/> consultato il 04/05/2019
13. “L’architettura della realtà virtuale” (n.d.) <http://www.intelligenzaartificiale.it/realta-virtuale/> consultato il 04/05/2019

14. Brocato A. “Realtà virtuale, cos’è e come funziona” (n.d.)
<https://www.robotiko.it/realta-virtuale/> consultato il 05/05/2019
15. Montagna L. “Realtà virtuale e realtà aumentata” “Dispositivi VR” nuovi media per nuovi scenari business, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.a 2018
16. Montagna L. “Realtà virtuale e realtà aumentata” “Dispositivi VR” nuovi media per nuovi scenari business, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.a 2018
17. Montagna L. “Realtà virtuale e realtà aumentata” “Dispositivi VR” nuovi media per nuovi scenari business, Milano, Ulrico Hoepli Editore S.p.a 2018
18. Rossetti A., Gheller P. “Manuale di optometria e contattologia” Zanichelli editore s.p.a , Bologna (2003)
19. P. Žiak, A. Holm, J. Halička, P. Mojžiš, D. P. Piñero “Amblyopia treatment of adults with dichoptic training using the virtual reality oculus rift head mounted display: preliminary results”, BMC Ophthalmology (2017)
20. Rossetti A., Gheller P. “Manuale di optometria e contattologia” Zanichelli editore s.p.a , Bologna (2003)
21. B. T. Backus, B. D. Dornbos, T. U. Tran, J. B. Blaha, M. Z. Gupta, Vivid Vision, Inc., “Use of virtual reality to assess and treat weakness in human stereoscopic vision” San Francisco, California, USA 2018
22. Reference Guide for Clinician Prepared by the American Optometric Association Consensus Panel on Care of the Patient with Accommodative or Vergence Dysfunction: J.S. Cooper, M.S., O.D., Principal Author Carole R. Burns, O.D. Susan A. Cotter, K. M. Daum, O.D., Ph.D. John R. Griffin, M.S., O.D. Mitchell M. Scheiman, O.D. Reviewed by the AOA Clinical Guidelines Coordinating Committee: John F. Amos, O.D., M.S., Chair Kerry L. Beebe, O.D. Jerry Cavallerano, O.D., Ph.D. John Lahr, O.D., Richard L. Wallingford, Jr., O.D. "Accommodative and Vergence Dysfunction" Approved by the AOA Board of Trustees Reviewed February 2001, Reviewed 2006 March 20, 1998
23. John.V. D’Antonio-Bertagnolli “Virtual Reality Vision Therapy VERVE” By OculoMotor Technologies”, with funding from New Jersey Institute of Technology, the New Jersey Health Foundation, The Eye Institute at Salus University, EPICS in IEEE, the National Institutes of Health, and the National Science Foundation. <https://medium.com/vr-first/virtual-reality-vision-therapy-verve-f7b9eeadc158> Oct 9, 2018
24. Alvarez, Tara L., Scheiman, Mitchell, Yaramothu, Chang, d’Antonio-Bertagnolli, John Vito, MS1,3, Santos, Elio M., “Treatment Results for Convergence Insufficiency using VERVE: Virtual Eye Rotation Vision Exercises: A Pilot Study” https://www.researchgate.net/publication/331443937_Proceedings_37_Virtual_Eye_Rotation_Vision_Exercises_VERVE_A_Virtual_Reality_Vision_Therapy_Platform_with_Eye_Tracking_March_2019

25. Tripodi M. 29 Sep. (2017) “Mal di VR: a che punto siamo nel combattere la nausea da realtà virtuale” <https://www.wired.it/gadget/videogiochi/2017/09/29/mal-vr-combattere-nausea-realta-virtuale/>
26. Pepicq B. 2 aprile (2017) “Perché giocare con la vr causa nausea? Quali sono le possibili soluzioni?” <https://www.androidpit.it/perche-giocare-con-vr-causa-nausea-possibili-soluzioni>
27. Lazzeri M. “Le controindicazioni attuali e future all’utilizzo della realtà virtuale”, 20 aprile (2017), <https://www.stateofmind.it/2017/04/realta-virtuale-controindicazioni/>
28. Pepicq B. 2 aprile (2017) “Perché giocare con la vr causa nausea? Quali sono le possibili soluzioni?” <https://www.androidpit.it/perche-giocare-con-vr-causa-nausea-possibili-soluzioni>
29. Tripodi M. 29 Sep. (2017) “Mal di VR: a che punto siamo nel combattere la nausea da realtà virtuale” <https://www.wired.it/gadget/videogiochi/2017/09/29/mal-vr-combattere-nausea-realta-virtuale/>