



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "G. Galilei"

Corso di Laurea in Ottica e Optometria

TESI DI LAUREA

La Realtà Virtuale: le implicazioni binoculari e le
sue applicazioni optometriche.

Relatore: Prof. Paolo Facchin

Laureanda: Giorgia Zaltron

Matricola: 1178708

Anno Accademico 2019/2020

INDICE

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	2
CAPITOLO I	3
1.1 La visione binoculare	3
1.2 La stereoscopia	8
1.3 La Realtà Virtuale	12
METODO	21
RISULTATI	23
CAPITOLO II	23
2.1 Accomodazione e vergenze	23
2.2 Eteroforie	33
2.3 Refrazione	37
CAPITOLO III	40
CONCLUSIONE	50
BIBLIOGRAFIA	54

ABSTRACT

Negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico ha cambiato il modo di vivere la quotidianità, aprendo nuove opportunità.

Si sta facendo sempre più strada la tecnologia della Realtà Virtuale nella vita di tutti i giorni: tra i giovani che la utilizzano per giocare ai videogames, ma anche tra i lavoratori.

Il proposito di questa tesi è stato quello di analizzare la Realtà Virtuale in ambito optometrico, indagando gli effetti visivi che si vengono a creare utilizzando questa tecnologia.

Sono stati indagati diversi parametri visivi, tra i quali lo stato dell'accomodazione e delle vergenze, le forie e la rifrazione per poter valutare se e come vengono influenzati.

Dagli studi analizzati, i quali sono stati pubblicati su riviste di settore, si evince che vi sono teorie contrastanti sui possibili effetti che vengono a crearsi.

Infatti, gli studi riportati non convergono alle stesse conclusioni.

Questo potrebbe essere dovuto dal fatto che sono stati usati diversi dispositivi VR, una diversa somministrazione di Realtà Virtuale e anche diversi compiti da svolgere.

Un ulteriore obiettivo della tesi è stato quello di individuare le applicazioni della Realtà Virtuale in relazione alla pratica optometrica.

Gli studi analizzati evidenziano che la tecnologia della Realtà Virtuale è uno strumento con un grande potenziale per il trattamento visivo in caso di ambliopia. È emerso che dopo un allenamento visivo con la Realtà Virtuale, i soggetti avevano dei miglioramenti sia per quanto riguarda l'acuità visiva che per la stereopsi.

Si è analizzato anche la Realtà Aumentata come promettente ausilio per i soggetti ipovedenti.

INTRODUZIONE

Oggi giorno la tecnologia è una parte integrante della nostra vita, la usiamo costantemente nelle azioni quotidiane, sia a livello ludico ma anche a livello lavorativo.

Ultimamente una tecnologia che sta prendendo sempre più piede è la Realtà Virtuale, che porta l'utente in un ambiente del tutto artificiale e digitale, ma così simile alla nostra realtà, che sembra di essere catapultati in un mondo parallelo.

È possibile provare questa esperienza attraverso diversi dispositivi elettronici, ma quello che verrà trattato in questa tesi è il visore 3D, il quale può assumere una forma di casco o di occhiale e portare l'utente a "vivere" una esperienza virtuale.

Mi sono prefissata di capire se il visore 3D può comportare degli effetti all'utente che lo utilizza, concentrandomi principalmente sugli aspetti visivi.

Si è ritenuto utile suddividere i vari possibili effetti visivi, analizzando separatamente lo stato dell'accomodazione e delle vergenze, le forie e l'errore refrattivo.

Mi sono ulteriormente chiesta se questo dispositivo possa essere utile nell'ambito optometrico. Quindi se possa essere utilizzato all'interno di uno studio per poter agevolare il lavoro dell'optometrista.

Inoltre, è stato indagato se la tecnologia della Realtà Virtuale possa essere utilizzata come mezzo terapeutico, quindi per poter migliorare le abilità dei soggetti che presentano delle carenze visive, come gli ambliopi.

Un ulteriore argomento trattato è se la Realtà Virtuale possa essere sfruttata per migliorare la visione di persone ipovedenti. Quindi se possa essere utilizzata per permettere al soggetto ipovedente di compiere in modo più agevole le azioni della vita quotidiana.

CAPITOLO I

1.1 La visione binoculare

L'essere umano è riuscito a raggiungere, rispetto agli altri esseri viventi, il più alto grado di binocularità: i due occhi, che sono i due organi in grado di inviare al cervello le informazioni visive, insieme a tutto il sistema che da parte da essi e giunge fino alla corteccia, possono essere considerati come un'unica unità sensoriale, nota anche come apparato visivo.

L'uomo, attraverso i suoi occhi, forma due immagini monoculari distinte, le quali vengono fuse insieme sotto l'azione di meccanismi neurologici, per creare un'immagine di qualità superiore.

Infatti, quando, in condizioni fisiologiche, si fissa un punto oggetto viene visto come singolo sulla retina di ciascun occhio, quindi si creano due immagini separate e indipendenti in entrambi gli occhi.

Si parla di binocularità quando, in modo attivo, l'apparato visivo riesce ad unire le due immagini viste separate in un'unica percezione. Per far sì che ciò avvenga, le direzioni visive di entrambi gli occhi devono essere simili, anche se non potranno essere del tutto identiche, poiché i due occhi sono situati in due spazi diversi nel nostro viso.

Inoltre, la qualità della visione binoculare è inversamente proporzionale alla presenza di eventuali deviazioni fra gli assi visivi.

Una delle componenti fondamentali della visione binoculare è la corrispondenza retinica. Ogni elemento retinico ha una localizzazione spaziale che gli è propria, ed è differente rispetto a quella degli altri punti retinici corrispondenti.

Per ogni punto retinico di occhio esiste un altro punto retinico, a cui è connesso, nel controlaterale ed entrambi hanno la stessa direzione visiva.

Questi punti retinici connessi tra loro vengono definiti elementi o punti retinici corrispondenti. I punti retinici corrispondenti principali sono quelli che coincidono con la fovea di entrambi gli occhi. Sono considerati i punti principali perché la fovea è considerata come il centro dell'organizzazione spaziale visiva, la quale viene definita come foveocentrica. [1] [2]

Quando gli occhi fissano un piccolo oggetto nello spazio, l'immagine di questo determinato oggetto viene proiettata sulle fovee ed esistono molti punti, nello

spazio, che formano immagini sugli altri punti retinici corrispondenti. Unendo insieme tutti questi punti retinici si ottiene l'oroptero teorico o il cerchio Vieth-Muller, che prende questo nome perché si pensava che l'oroptero avesse la forma di un cerchio perfetto. Successivamente venne determinato soggettivamente l'oroptero empirico e si intuì che la sua forma reale, deviava da quella di un cerchio, presentando una curvatura inferiore e variabile in funzione della distanza.

Per cui in realtà l'oroptero avrebbe una forma più complessa, definendo una superficie curva, piuttosto che una linea curva. [3]

Tutti i punti che non sono situati nell'oroptero, quindi sono situati al di fuori di esso, vengono percepiti come doppi, le immagini dei punti vengono proiettate sulle retine in punti che non sono corrispondenti, vengono detti punti retinici disparati.

Il vedere doppio, meglio detta diplopia fisiologica, è una situazione che si manifesta sempre durante la visione di oggetti che sono situati prima o dopo l'oroptero. Il soggetto, tuttavia, non si rende conto di questa diplopia, in quanto la sua concentrazione è sull'oggetto di interesse e avvengono dei fenomeni di soppressione, che permettono di trascurare le interazioni fra punti non corrispondenti.

Quando il punto è più lontano dell'oroptero, si dice diplopia omonima, ovvero ciascun oggetto è visto nello stesso lato dell'occhio che ha generato l'immagine, mentre se il punto è localizzato più vicino, si dice che diplopia crociata, ovvero ciascun oggetto viene visto nel lato opposto dell'occhio che lo ha generato. [1] [2]

Per dimostrare il fenomeno della diplopia si possono semplicemente usare due penne, o in alternativa anche le dita della mano, e si mettono a due distanze diverse, una più vicina, circa 20 cm, rispetto all'altra che è posta circa a 40 cm, ad altezza dell'asse visivo. Se si guarda la prima mira, si vedrà la penna posta più lontana doppia e se si prova a chiudere prima un occhio e poi l'altro si vedrà il fenomeno della diplopia omonima, mentre se si osserva la penna più lontana, si vedrà la penna più vicina al piano facciale come doppia e se si prova a chiudere un occhio e successivamente l'altro si potrà notare il fenomeno della diplopia crociata.

La visione binoculare è un processo complesso e si distinguono tre gradi principali della percezione binoculare o della fusione di Worth.

Il primo grado della fusione è detto grado della percezione simultanea, il secondo è il grado della fusione e il terzo ed ultimo è la stereopsi.

I tre gradi hanno questo determinato ordine, poiché deve essere presente il grado precedente per avere anche il successivo, ovvero per avere il secondo grado è fondamentale avere anche il primo grado e via dicendo. Nel caso dei primi due gradi, nella misurazione clinica, si valuta la presenza o l'assenza del grado, mentre per quanto riguarda il terzo grado si valuta l'assenza, la presenza e nell'ultimo caso viene anche quantificata.

Con il primo grado, la visione simultanea, si valuta se il soggetto riesce a vedere in biocularità, ovvero se è in grado di vedere, avendo entrambi gli occhi aperti e attivi, due immagini generate da ciascun occhio o se eventualmente sopprime un occhio.

Con il secondo grado, la fusione, si valuta se il soggetto è in grado di fondere insieme due immagini simili.

Si distinguono due tipologie di fusione: quella motoria e quella sensoriale.

Per osservare un oggetto, i muscoli oculari lavorano per posizionare sulle aree corrispondenti le immagini che si vengono a creare sulle retine, questa è la fusione motoria, e la psiche si attiva in modo da creare un'unica immagine partendo dalle due che vengono percepite separatamente dai due occhi, questa è la fusione sensoriale. [1]

La fusione sensoriale è il meccanismo che permette di associare, con un unico percetto le immagini dei punti retinici corrispondenti, individuabili dall'oroptero.

Però non sempre gli occhi si allineano perfettamente sul medesimo punto di fissazione, spesso capita che vi sia un piccolo errore, ovvero uno dei due occhi non si dirige esattamente sullo stesso punto, ma molto vicino. Questo fenomeno prende nome di disparità di fissazione. Essendoci una piccola differenza nella fissazione, in teoria si dovrebbe vedere doppio, ma questo non accade e si riesce a vedere singolo, grazie al meccanismo di fusione che fornisce un singolo percetto.

Quindi, si può definire che nello spazio oggetto, l'oroptero non è semplicemente una superficie, ma in realtà ha un certo spessore, perché si riesce, appunto, a fondere nonostante i due occhi non fissino precisamente lo stesso punto.

Questo avviene grazie all'area di Panum, che può essere considerata come un'espansione dell'oroptero e quest'ultimo può essere definito come un volume di tolleranza per la visione singola.

Quindi l'oroptero non è solitamente una superficie, ma può essere rappresentato come un solido.

Anche per quanto riguarda lo spazio immagine, quindi la rappresentazione nella retina, si può spiegare la solidità dell'oroptero grazie all'area di Panum.

Si può spiegare con il fatto che se un occhio si dirige esattamente su un punto, che si trova sull'oroptero e l'altro occhio punta con una certa disparità, quest'ultimo punto non verrà proiettato esattamente sulla fovea, ma in una posizione leggermente eccentrica, senza che si verifichi diplopia.

Questo avviene perché si può applicare il concetto di area di Panum anche a livello retinico: per ogni punto P della retina è possibile trovare nella retina del controlaterale un'area circolare di punti, con centro nel punto corrispondente di P, e tutti questi punti che si trovano all'interno di questa piccola area circolare, che può essere considerato come un campo visivo, possono essere fusi con il punto corrispondente P dell'altro occhio.

Questa relazione permette di spiegare che l'accettazione della disparità dell'immagine non è solo un elemento di tolleranza, ma è anche uno strumento fondamentale attraverso il quale il meccanismo binoculare riconosce la tridimensionalità degli oggetti. [4]

Il terzo grado, la stereopsi, è la capacità di percepire la profondità sfruttando la diversa posizione degli occhi, che porta ad avere due immagini retiniche dell'oggetto d'interesse simili, ma non identiche, e questo viene sfruttata dalla psiche, la quale fonde le due immagini, traendone informazioni sulla profondità e sulla locazione spaziale degli oggetti.

La stereopsi non opera solo a livello binoculare, ma anche monocolarmente.

Infatti, la visione tridimensionale si basa anche su indicatori monoculari di profondità: sono degli aspetti percettivi che permettono al soggetto di captare delle informazioni sulla posizione spaziale, ad esempio, degli oggetti.

Tra gli indicatori monoculari di profondità vi sono:

- La conoscenza degli oggetti, è un elemento fondamentale non solo per poterli riconoscere, ma anche per poterli collocare in maniera corretta nello spazio;

- Movimenti parallattici, i quali sono dei movimenti apparenti degli oggetti quando si muove la testa. Se fissando un oggetto, proviamo a girare lentamente la testa, si noterà che gli oggetti che sono posti dietro all'oggetto di interesse sembrano muoversi nella stessa direzione in cui moviamo la testa, mentre gli oggetti posti davanti sembrano muoversi in direzione opposta;
- L'illuminazione e le ombre;
- La sovrapposizione, quando un oggetto nasconde parzialmente un altro oggetto, quest'ultimo è visto più lontano;
- La prospettiva area, gli oggetti più distanti vengono visti con una minor intensità di colore e con minor contrasto rispetto agli oggetti più vicini;
- L'altezza sull'orizzonte, maggiore sarà l'altezza sull'orizzonte, maggiore sarà la distanza
- La prospettiva geometrica.

Inoltre, la stereoacuità, ovvero la misura della stereopsi, avviene binocularmente e l'unità di misura è in secondi d'arco. Si definisce buona una stereopsi di 60 secondi d'arco.

Inoltre, si può affermare che “la misura della soglia della stereoscopia corrisponde alla soglia di rilevamento della disparità binoculare”. [4]

Per capire meglio ciò, si immagina un soggetto che guardi davanti a lui in un piano mediano, due punti, A e B, posti a due diverse distanze. La minima distanza tra i due punti che il soggetto riesce a percepire come diversa profondità a cui essi si trovano, viene detta soglia stereoscopica.

La soglia stereoscopica, detta anche acuità stereoscopica, può essere definita come una misura angolare, data dalla differenza tra la convergenza che è necessaria per fissare il punto A, espressa da un angolo α , e dalla convergenza necessaria per puntare il punto B, espressa da un angolo β .

Questa differenza può essere espressa da tale equazione: $\eta = \alpha - \beta$, che rappresenta la disparità geometrica (η) tra i due punti e anche la disparità retinica. [4]

La stereopsi dipende dalla disparità che vi è tra le due immagini ed è in funzione del campo visivo, è maggiore nella porzione centrale rispetto alla parte periferica, nella quale si riduce considerevolmente.

Come citato precedentemente, la visione binoculare è un sistema molto complesso, quindi è possibile trovare, anche in maniera frequente, delle condizioni di deviazione se gli occhi non si orientano in maniera adeguata e precisa verso l'oggetto di interesse.

Esiste una condizione, che prende il nome di tropia o strabismo, che è una eccessiva deviazione manifesta. Questa deviazione è in grado di smantellare in modo proporzionale alla sua entità, una fisiologica visione binoculare. La visione binoculare è persa, perché un occhio appare deviato, mentre l'altro è diretto verso l'oggetto d'interesse.

Invece, entro certi limiti vi sono delle deviazioni che sono considerate fisiologiche. Una di queste condizioni, che prende il nome di foria, è considerata una deviazione latente degli occhi; si riesce a rilevare questa deviazione in assenza di fusione, quindi è rilevabile solo in dissociazione.

Quando nella fissazione di un oggetto, gli occhi si orientano in modo da allineare fra loro tutti i punti retinici corrispondenti, senza utilizzare meccanismi di correzione (vergenze fusionali) allora si parla di ortoforia (assenza di deviazione latente). In caso contrario, se per allineare tutti i punti retinici corrispondenti occorre l'intervento delle vergenze fusionali, si parla di eteroforia.

Quando la vergenza fusionale opera in divergenza, per riallineare i punti retinici corrispondenti di occhi tendenzialmente convergenti, si parla di esoforia, mentre al contrario di exoforia

Esistono anche le eteroforie verticali e quelle torsionali.

1.2 La stereoscopia

Nell'Ottocento si iniziò a interrogarsi se fosse possibile sfruttare la capacità del sistema visivo di percepire la profondità, grazie alla quale si riesce a capire l'aspetto volumetrico della realtà, a capire dove sono collocati gli oggetti nello spazio e quindi si riesce a muoversi anche nello spazio. È un'abilità che è estremamente utile

e che viene utilizzata costantemente, basti pensare come sarebbe complicato riuscire a infilare il filo nell'ago senza il senso di profondità.

Come citato precedentemente, riusciamo a percepire la tridimensionalità perché gli occhi vedono due immagini che sono non sono perfettamente identiche, un occhio ha un'angolazione leggermente diverso dall'altro e queste due immagini vengono sovrapposte e fuse insieme grazie all'azione dei meccanismi neurologici.

Inizìò, dunque, a prendere sempre più piede la stereoscopia, che etimologicamente deriva dal greco antico: *στερεός*, solido, e *σκοπία*, osservazione, letteralmente sarebbe l'osservazione del solido, che si può tradurre in: percezione di un rilievo.

[5]

Il termine "stereoscopico", in realtà, venne utilizzato per la prima volta dal belga François de Aguilón, che nel 1613 scrisse "Francisci Aguiloni e Societate Iesu Opticorum libri sex: philosophis iuxta ac mathematicis utiles", nel quale è presente un capitolo dal titolo: "De stereographice altero projectionis genere ex oculi contactu".

Si pensa anche che le prime immagini stereoscopiche risalgano a pittori come Giovanni Battista Della Porta (1538-1615), Jacopo Chimenti, detto l'Empoli (1554-1640). Esistono pensieri contrastanti se effettivamente furono loro tra i primi disegnatori delle immagini stereoscopiche. [6]

Successivamente, tra il 1832 e il 1838, Charles Wheatstone studiò e realizzò il primo modello di stereoscopio, con il quale si poteva osservare in rilievo una coppia di disegni molto simili tra loro, ma realizzati con due punti di osservazione leggermente diversi e venivano osservati attraverso un visore a riflessione composto da due specchi, i quali erano posizionati a 45°. Il soggetto doveva avvicinarsi agli specchi e far scorrere le immagini fino a farle sovrapporre per creare l'illusione di tridimensionalità. Purtroppo, lo strumento non ricevette tanta attenzione.

Al contrario lo stereoscopio di Brewster riscosse più successo, anche perché era più maneggevole rispetto a quello di Wheatstone.

Lo stereoscopio di Brewster era costituito da un visore lenticolare e da due lenti positive inserite in una scatola di legno, al lato di essa era possibile inserire i disegni stereoscopici che potevano essere spostati fino alla sovrapposizione grazie a due piccoli pomelli. [7]

Successivamente, nel 1852, ci fu l'invenzione della fotocamera binoculare da parte di J. B. Dancer, un ottico di Manchester.

Era una fotocamera particolare dotata di due obiettivi paralleli posti alla stessa distanza che vi è tra gli occhi dell'uomo.

In questo modo si riusciva a ricreare in maniera artificiosa immagini tridimensionali, visto che si scattavano due fotografie pressoché identiche, con lo stesso soggetto, prese nello stesso momento e alla stessa distanza, cambiava solo l'angolazione, infatti venivano scattate con due angolazioni lievemente diverse, come si vede nella Figura.1, per simulare la differente angolazione che esiste tra i nostri occhi.



Figura. 1 Fotografie stereoscopiche del 1860

Una volta scattate le foto, queste dovevano essere osservate con gli appositi sistemi stereoscopici.

Joseph D'Almeida, nel 1858, presentò le prime proiezioni con la lanterna magica. Essa utilizza la tecnica dell'anaglifo, che fu ideata cinque anni prima da Wilhelm Rollman. Questa tecnica prevede di osservare delle immagini sovrapposte e diversamente colorate con l'utilizzo di un occhiale con filtri colorati che corrispondono ai colori usati nelle immagini. Ogni occhio osserva, grazie ai filtri colorati, solo l'immagine del colore che gli compete. [6]

Negli anni successivi l'americano Oliver Wendell Holmes divenne promotore della diffusione dello stereoscopio Brewster-Holmes, il quale è composto da due lenti positive, che a differenza di quello di Brewster, ha gli oculari a una distanza maggiore della distanza che vi è tra i due occhi, per creare un effetto prismatico a base tempiale. [1]

Successivamente l'interesse per la stereoscopia si fece meno a causa del sopravvento della fotografia tradizionale.

La stereoscopia non sarà più così diffusa, ma sarà sfruttata periodicamente per iniziative editoriali e cinematografiche.

Un esempio è la promettente stagione del cinema in tre dimensioni nel quinto decennio del Novecento, ma si concluse per le difficoltà incontrate nella realizzazione dell'apparecchiature e dei formati delle riprese e delle proiezioni cinematografiche. [6]

Le prime visioni al cinema erano per lo più immagini in bianco e nero fisse o con movimenti ciclici, che venivano proiettate attraverso l'utilizzo di uno stereoscopio. Poi, alla fine dell'Ottocento si iniziò ad utilizzare la tecnica dell'anaglifico, per poi passare ai primi film a colori, intorno al 1952, che venivano proiettati in doppia pellicola con il sistema dei filtri polarizzati. Questa tecnica si basa sul proiettare nello stesso momento e sullo stesso schermo immagini parallele, polarizzate da speciali filtri ortogonali.

Il soggetto, inoltre, deve indossare un occhialino con lenti polarizzate, in questo modo la luce dell'immagine destra o sinistra viene filtrata, così ogni occhio può vedere solo un'immagine.

Inoltre, esiste anche uno schermo LCD 3D che funziona senza l'uso di occhialini. Questo è possibile grazie a un sistema che prevede che questi schermi abbiano una barriera parallela, detta barriera di parallasse, che invia segnali differenti ai nostri occhi. Infatti, ogni occhio vede una parte differente di questa barriera, riceve con l'angolazione diversi set di pixels. [8]

Si è vista una svolta non solo per quanto riguarda gli schermi, ma anche per come vengono utilizzati e dove vengono collocati.

Negli ultimi anni si sta sviluppando sempre più il concetto di Realtà virtuale e soprattutto dei display montanti sulla testa (HMD) che permettono al soggetto di entrare in un ambiente virtuale.

1.3 La Realtà Virtuale

Si può considerare la Realtà Virtuale (VR) come un ambiente interamente digitale, che viene creato da dei computer, per simulare la nostra effettiva realtà creandone una artificiale. Per renderla più veritiera si adoperano delle console, che permettono di trasmettere questo ambiente digitale ai nostri sensi e di coinvolgerli attraverso un'interazione in tempo reale con tutto ciò che avviene all'interno di questo ambiente.

Queste informazioni che i nostri sensi ricevono sono possibili grazie all'utilizzo di dispositivi informatici, come le visiere per la vista, i guanti per il tatto. [9]

Per giungere alla Realtà Virtuale come è intesa oggi ci sono voluti anni e molti studi diversi.

Si può definire come padre della Realtà Virtuale il regista statunitense Morton Heilig, che, nel 1957, costruì un macchinario denominato "Sensorama", brevettato nel 1962, che prevedeva il coinvolgimento della totale percezione sensoriale attraverso un'esperienza ludica.

Come si può notare nella Figura.2, il macchinario ricorda l'aspetto di un cabinato da sala giochi; il soggetto si sedeva comodamente in una seduta e osservava delle immagini stereoscopiche o piccole sequenze cinematografiche appositamente create per essere visualizzate in questo macchinario.

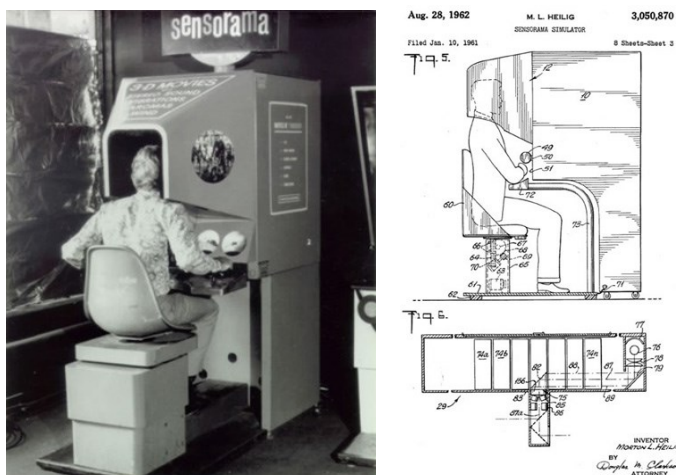


Figura. 2 "Sensorama" [10]

Il soggetto veniva coinvolto dal macchinario grazie a vari meccanismi come: i diffusori di odori e profumi, la dotazione degli altoparlanti stereo, i getti d'aria

indirizzati verso il viso per simulare il vento, la poltrona dotata di un meccanismo di leve per simulare la sensazione di movimento e un manubrio, sul quale si doveva poggiare le mani, per dare anche una percezione tattile.

Purtroppo, questo macchinario rimase solo un prototipo. [10]

Successivamente Heilig progettò la Telesphere Mask, la quale fu il primo prototipo di display montato sulla testa (HMD) senza il meccanismo di tracciamento del movimento del soggetto.

Il meccanismo di tracciamento del movimento è una componente chiave della Realtà Virtuale, perché grazie ad esso il soggetto riesce a muoversi ed esplorare l'ambiente digitale, infatti il punto di vista del gioco si sposta in base ai movimenti della testa dell'utente.

Nel 1961, due ingegneri svilupparono un display HDM simile alla concezione che ne abbiamo noi oggi. Fu il primo display che prevedeva un sistema di tracciamento del movimento. [11]

Poi, tra il 1965 e 1968, fu sviluppato il "Sword of Damocles" da parte di Ivan Sutherland, il quale era "un congegno VR composto da due tubi a raggi catodici ed elementi ottici che proiettano delle immagini generate al computer". [12]

La grafica primitiva permetteva di vedere vere e proprie stanze e gli oggetti contenuti in esse.

Però era così pesante che doveva essere sostenuto da un braccio meccanico, quindi siamo ancora lontano dai visori che esistono oggi in commercio.

Negli anni del 1980 fu fondata la prima compagnia di vendita di visori, da parte di Jaron Lanier e Thomas Zimmerman, di nome VPL Research.

Addirittura, la NASA, grazie all'ingegnere Crystal River, creò Project View, ovvero un simulatore di realtà virtuale per addestrare gli astronauti. [11]

Iniziarono svilupparsi anche i visori in campo videoludico: la Sega Corporation, multinazionale giapponese, lanciò, nel 1993, il visore Sega VR e la Nintendo, nel 1995, lanciò la Virtual Boy Nintendo; il primo non fu mai venduto e il secondo non ebbe successo.

La svolta si ebbe nel 2012 grazie a Palmer Luckey che fondò la Oculus VR e ideò il visore Oculus Rift, il quale ebbe un grandissimo successo. Furono messi nel mercato anche HTC Vive e Playstation VR.

La realtà virtuale ha preso piede anche nei cinema, infatti ad Amsterdam è stato aperto il primo Virtual Reality Cinema, nel quale si può vedere un corto di circa 30 minuti con l'utilizzo del visore che fa immergere totalmente il soggetto all'interno del corto. [12]

Oggigiorno si considera che la tecnologia virtuale è costituita principalmente da:

- Un sistema di elaborazione centrale, che comprende uno o più computer, i quali creano l'ambiente virtuale grazie all'uso di software specifici. L'ambiente virtuale è la rappresentazione, che questi computer riescono a ricreare, di uno spazio tridimensionale e degli oggetti contenuti;
- I dispositivi di interfaccia (ad esempio casco, apparati tattili come i guanti) che mettono in relazione il soggetto e la simulazione ricreata dal computer. Grazie a questi dispositivi il soggetto viene interamente "immerso" in questo ambiente digitale, all'interno del quale riesce a interagire con gli oggetti e riesce a muoversi al suo interno proprio come se si trovasse nel nostro mondo reale.

Inoltre, grazie a un sistema di tracciamento che capta la posizione e i movimenti, il soggetto vede che i movimenti da lui compiuti portano, in tempo reale, a un mutamento dell'ambiente digitale. [13]

Come afferma anche Federick P. Brooks Jr., la Realtà Virtuale è una tecnologia che coinvolge molteplici discipline: la tecnologia dell'informazione, della grafica, dei computer e dell'elettronica e attraverso essi riesce a far immergere l'utente in un mondo totalmente digitale e virtuale, nel quale esso riesce a interagire con l'ambiente creato e con gli oggetti in esso contenuto. [14]

Si può descrivere la Realtà Virtuale attraverso sette concetti che la rappresentano:

- 1) Simulazione, la computer grafica riesce a ricreare un ambiente digitale che è confrontabile con il mondo reale;
- 2) Interazione, è il collegamento che si viene a creare tra i vari dispositivi elettronici e uno o più utenti;
- 3) Artificialità, perché attraverso l'utilizzo del computer si riesce a ricreare un mondo che sembra reale ma non lo è;

- 4) Immersione, l'utente grazie all'utilizzo dei display montati sulla testa (HMD) e ad altri dispositivi riesce a "immergersi" nell'ambiente digitale;
- 5) Telepresenza, l'utente è presente contemporaneamente in due luoghi diversi e distanti: un ambiente virtuale e la realtà effettiva;
- 6) Immersione completa del corpo, l'utente grazie all'utilizzo di specifici dispositivi (visori, guanti) riesce a muoversi e a compiere delle azioni anche nel modo digitale;
- 7) Comunicazione in rete, la possibilità che gli utenti possano condividere attraverso vari mondi virtuali. [15]

Quando si parla di visore si intende o il casco o l'occhiale che si monta sulla testa (HMD) e sono visori 3D, infatti hanno un display stereoscopico che fornisce immagini separate per ciascun occhio.

Per poter utilizzare in maniera ottimale la Realtà Virtuale è determinante utilizzare un visore che abbia delle specifiche caratteristiche: deve avere un campo visivo dai 100 ai 110 gradi, un frame rate, ovvero la frequenza di immagini che vengono proiettate al secondo, compreso tra i 60 fps e i 120 fps.

Deve essere presente un giroscopio che consenta lo Head Tracking: l'immagine deve spostarsi in maniera coerente con i movimenti dell'utente e in pochissimi millisecondi per rendere la simulazione il più realistica possibile.

Per far sì che il soggetto viva appieno questa esperienza, nel visore è inserito anche un sistema audio per sentire i suoni che provengono da tutte le direzioni.

Per ricreare il senso di profondità di campo, vi è il eye tracking, ovvero un sistema di puntamento ad infrarossi, che permette di cogliere il movimento oculare. [9]

Grazie a questi sistemi sofisticati si può affermare che il visore coinvolge in modo molto significativo l'utente, riesce a sollecitare molteplici sensi, come la vista e l'udito, se integrato con altri dispositivi si può coinvolgere anche il tatto; grazie ai sistemi di rilevamento dei movimenti, catapulta il soggetto in un mondo diverso e virtuale, ma dove sembra di trovarsi realmente.

Esistono tre tipologie diverse di visori della Realtà Virtuale:

- Visori di smartphone, i quali usano come schermo e processore il cellulare;
- Display montati sulla testa (HMD), i quali sono collegati a un computer o a una console;
- Display standalone, i quali sono indipendenti sia dal computer sia dagli smartphone. [16]

Inoltre, bisogna fare una suddivisione per quanto riguarda la Realtà Virtuale: vi è quella immersiva, nella quale l'utente viene totalmente coinvolto dall'ambiente virtuale e trasportato in questa realtà parallela.

In questa condizione si utilizza il visore VR che è in grado di estraniare completamente l'utente dalla realtà.

Vi è, poi, quella non immersiva, che crea anch'essa un'ambiente digitale, ma l'utente è coinvolto in modo più lieve.

Infatti, in questa condizione di Realtà Virtuale si utilizza solitamente il visore di smartphone o una televisione 3D che funge da finestra per il mondo tridimensionale, che comportano una minore estraniamento dalla realtà. [9]

I visori 3D stanno diventando sempre più comuni e vengono utilizzati per diversi motivi.

Quando si pensa ai visori viene spontaneo associarli in maniera quasi immediata al mondo del videoludico, quindi utilizzarli per giocare con i videogames, ma in realtà hanno anche altri campi d'impiego.

Possono essere utilizzati, ad esempio, in campo medico. È diventato famoso l'intervento del Dr. Shafi Ahmaed, che operando al Royal London Hospital, ha trasmesso in diretta tale intervento che poteva essere visto attraverso la Realtà Virtuale. Questo potrebbe diventare un potente mezzo per improntare una nuova tipologia di insegnamento agli studenti di medicina. [17]

È utilizzabile anche in campo psicologico, infatti permettono al clinico o al ricercatore di creare delle simulazioni molto simili a dei contesti della vita quotidiana (abitativi, lavorativi) che gli permettono di capire come il paziente interviene in queste situazioni. Queste simulazioni permettono al ricercatore di capire maggiormente i processi cognitivi del paziente in contesti simili alla vita reale.

Possono essere utilizzati, ad esempio, per la cura delle fobie, come la paura del volo, l'agorafobia, per insegnamenti di abilità a bambini autistici. [13]

È applicabile anche al mondo della progettazione edile, sia per quanto riguarda la costruzione che la ristrutturazione di interni. Si può ricreare il progetto finale tramite un software e poterlo vedere attraverso la Realtà Virtuale.

Un altro campo, nella quale viene utilizzato che, da studentessa di Optometria, mi interessa maggiormente è il campo optometrico.

Come si approfondirà in seguito, la Realtà Virtuale può essere utilizzata, ad esempio, in caso di terapia in soggetti con ambliopia.

Un altro aspetto importante da sottolineare è se la Realtà Virtuale può avere degli effetti. Si è già visto che il videogioco normale può dare origine a delle problematiche come dimostra lo studio di José Antonio Ponce-Blandón et al. nel quale si afferma che l'uso eccessivo di videogames può trasformarsi in una vera e propria dipendenza. Questo uso prolungato può comportare dei cambiamenti per quanto riguarda lo stile di vita del soggetto, portandolo ad assumere una vita inattiva e sedentaria, può causare danni anche in termini di relazioni familiari, rendimento scolastico e maturazione durante l'adolescenza. [18]

Quindi, si può sospettare che un uso prolungato può portare a delle problematiche come la chiusura in sé stessi e una alienazione del mondo. È importante saper utilizzare questi dispositivi in modo adeguato e con moderazione.

Infatti, su questo ultimo particolare dell'uso frequente dei videogames, è stato condotto uno studio, nel quale si afferma che un uso prolungato di gioco al computer può indurre dei cambiamenti temporanei, portando ad un disagio fisico, come male al collo, alle spalle, perché magari il soggetto ha assunto una posizione sbagliata e porta a mutamenti anche per quanto riguarda il sistema visivo.

Per provare ciò sono stati compresi in questo studio cinquanta studenti universitari sani e li hanno fatti giocare costantemente con videogames per quattro ore, dalle 18:00 alle 22:00 di sera.

Prima e dopo queste ore di gioco gli studiosi hanno eseguito dei test per misurare il punto prossimo accomodativo, il punto prossimo di convergenza, l'acuità visiva, la capacità dell'accomodazione e delle vergenze tramite flipper, le forie orizzontali a 33 cm 3 metri. Hanno anche, tramite una telecamera, misurato la quantità e la qualità dell'ammiccamento.

Dopo le quattro ore di gioco costante gli studiosi hanno notato delle differenze, infatti i risultati dello studio sembrerebbero indicare variazioni di stato dei parametri misurati: ad esempio una tendenza verso l'esoforia da lontano con dei valori pre sessione di $0,76 \pm 1,71$ e post di $0,83 \pm 2,25$ DP, anche se la differenza non sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p=0,193$) e da vicino pre sessione di $3,73 \pm 3,93$ e post di $5,75 \pm 4,85$ DP e la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,001$).

Vi è anche una modifica del punto prossimo di convergenza, prima di giocare il valore era $7,23 \pm 1,64$ cm e dopo il gioco di $8,77 \pm 1,60$ cm, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,001$), mentre il punto prossimo di accomodazione di $7,79 \pm 1,44$ cm prima di giocare e di $9,11 \pm 1,93$ cm, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,001$) dopo la sessione di gioco.

È stata misurata una diminuzione della capacità delle vergenze da 14.42 ± 3.20 cpm pre gioco a 12.68 ± 3.98 cpm, la variazione sembrerebbe essere significativa ($p < 0,00$) post gioco e dell'accomodazione da 16.94 ± 3.16 cpm pre gioco a 15.02 ± 3.67 cpm, la variazione sembrerebbe essere significativa ($p < 0,001$) post gioco.

La mattina seguente sono stati eseguiti nuovamente i test e si è notato che le differenze che erano state trovate erano solo temporanee. [19]

Come obiettivo mi sono prefissata di capire se ci sono degli effetti anche quando si utilizza il visore 3D, soffermandosi sugli effetti a livello visivo.

Inoltre, esiste anche la Realtà Aumentata, abbreviata in AR, la quale è una tecnologia avanzata che si basa sulla Realtà Virtuale con la finalità di creare una visione potenziata della realtà tramite l'utilizzo di computer.

Infatti, con l'utilizzo della Realtà Aumentata si riesce a sovrapporre il mondo virtuale, generato dal computer, agli ambienti del mondo reale, inserendo elementi virtuali od ologrammi interattivi.

Bisogna prestare attenzione nel non confondere la Realtà Aumentata con la Realtà Virtuale, infatti la prima "arricchisce" l'ambiente del mondo reale e ne sfrutta gli elementi già presente, mentre la seconda, attraverso le tecnologie digitali, riesce a ricreare un ambiente totalmente virtuale.

Quando si parla di Realtà Aumentata si possono intendere due differenti tecnologie. La prima è quella che sta avendo un successo maggiore ed è possibile viverla tramite l'utilizzo di dispositivi mobili.

I dispositivi mobili, intesi come smartphone e tablet, i quali devono essere dotati di fotocamera, GPS e bussola, possono essere utilizzati per visualizzare tramite una serie di dati l'ambiente "arricchito", il quale viene visualizzato tramite l'obiettivo della videocamera del dispositivo utilizzato.

Nella Figura.4 si può notare un esempio di Realtà Aumentata visualizzata tramite uno smartphone.



Figura. 3 Realtà Aumentata tramite smartphone [9]

La seconda tecnologia è quella che viene creata tramite l'elaborazione su un computer. La Realtà Aumentata, in questo caso, si basa su specifici software in grado di elaborare dei disegni per creare immagini, filmati e altri contenuti multimediali.

Un esempio di come è stata utilizzata questa seconda tecnologia di Realtà Aumentata è uno spot della Pepsi Max, realizzata nel 2014 in Inghilterra. Lo spot

era ambientato in una fermata dell'autobus, chiunque si sedesse sulla panchina della fermata veniva trasportato in un modo in cui animali, come tigri, piovre giganti, si trovavano a vivere nell'ambiente circostante. [9]

METODO

Per la stesura di questa tesi, è stata inizialmente svolta una ricerca su Google inserendo come “keywords” nella barra di ricerca “Realtà Virtuale” ottenendo 30.000.000 risultati.

Da ciò si può intendere che la Realtà Virtuale ha un impatto mondiale, visto la quantità di risultati ottenuti.

Attraverso il motore di ricerca Google sono state cercate principalmente pagine di siti internet, articoli che descrivessero in generale cos’è la Realtà Virtuale, come funziona e la sua storia.

Inoltre, è stata cercata anche la storia della stereoscopia.

Successivamente si è attinto a un archivio più autorevole e specifico come PubMed, per cercare articoli più mirati.

Quando si inseriscono le parole “Virtual Reality” sul motore di ricerca ci si rende conto che escono numerosi risultati, per la precisione 12,689 risultati.

Dalla Figura.3 si può notare che i primi articoli presenti in archivio sono del 1985 e che la crescita delle pubblicazioni sulla Realtà Virtuale negli ultimi anni è stata molto importante, a testimoniare un interesse scientifico sempre maggiore dell’argomento.

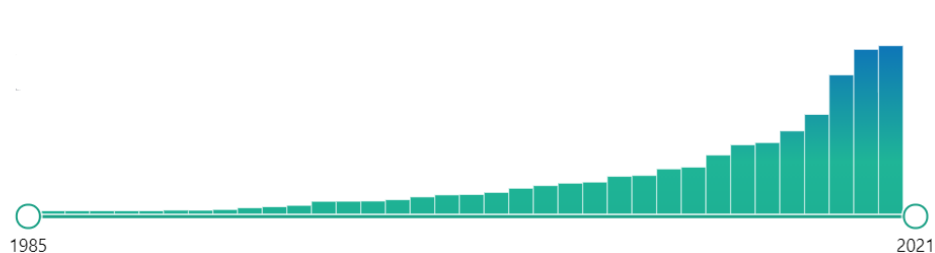


Figura. 4 Risultati di PubMed

Aggiungendo anche la parola “effects” si sono ottenuti 4,850 risultati.

Sfogliando i vari articoli si nota che vengono affrontati vari aspetti della Realtà Virtuale come: l’aspetto psicologico, l’aspetto tecnico della realizzazione, aspetti visivi.

Si è analizzata, poi, l’aspetto optometrico, quindi è stata raffinata la ricerca mettendo anche la parola “vision” e si sono ottenuti 619 risultati.

Raffinando ulteriormente la ricerca per avere articoli ancora più mirati si state inserite combinazioni di parole come “binocular disorder virtual reality” e si sono ottenuti 14 risultati.

È stata svolta anche una ulteriore ricerca per leggere articoli che trattano della Realtà Virtuale come un mezzo utile per l’ipovisione. Inserendo “Low vision virtual reality” si ottengono 61 risultati.

Riassumendo, si possono vedere nel Grafico.I i risultati ottenuti nel motore di ricerca di PubMed:

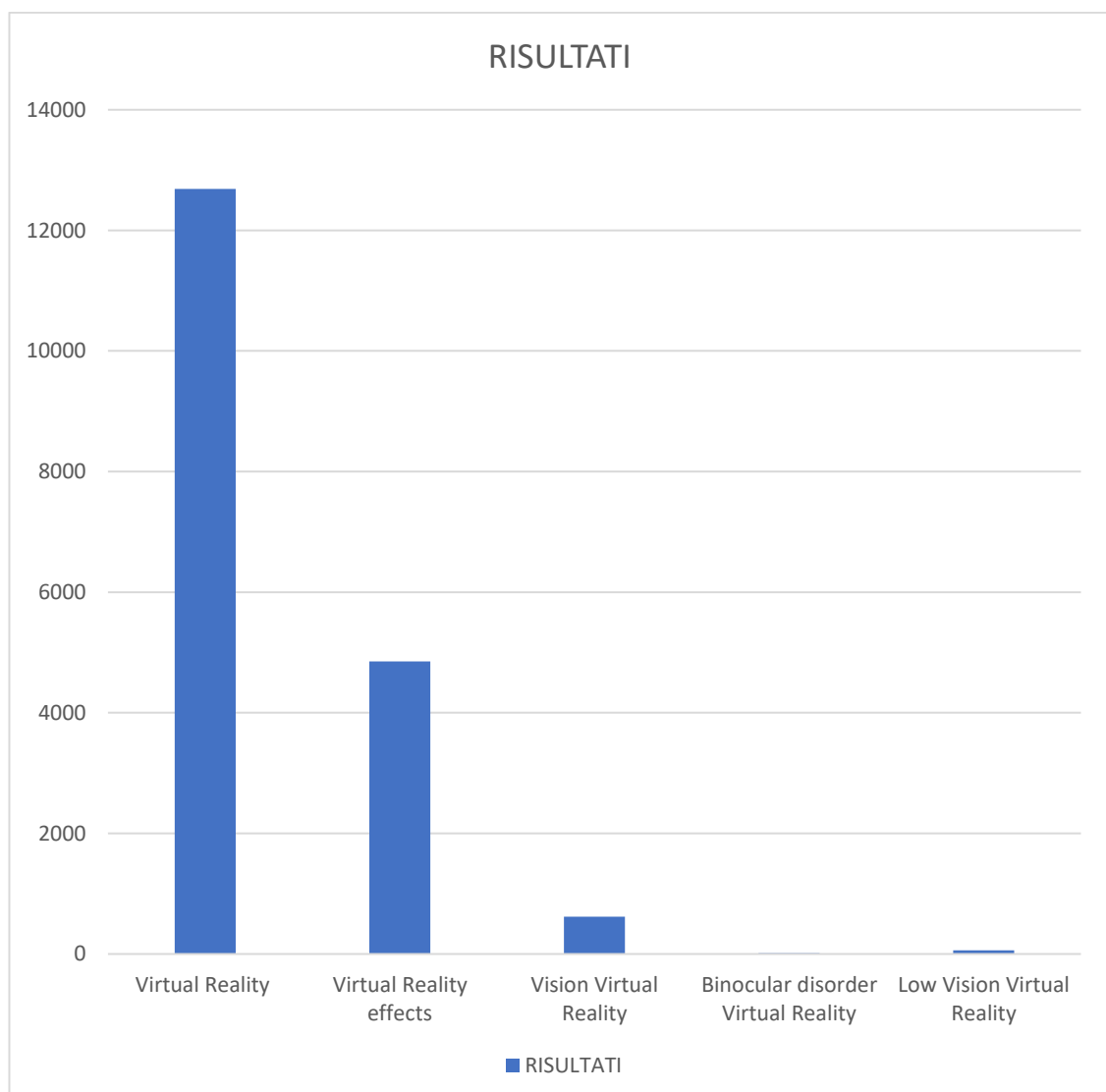


Grafico. I Risultati ottenuti in PubMed

RISULTATI

CAPITOLO II

Dopo aver esposto il concetto di Realtà Virtuale e il suo funzionamento, è possibile procedere nell'esaminare quali effetti vengono a crearsi quando si utilizza questa determinata tecnologia.

In questo capitolo ci si soffermerà sull'indagare, in particolare, gli effetti oculari supportata dall'utilizzo di articoli trovati su PubMed.

Per renderlo il più chiaro possibile, si ritiene utile suddividere i vari possibili effetti, analizzando separatamente lo stato dell'accomodazione e delle vergenze, le forie e l'errore refrattivo.

I seguenti studi si basano sul proporre, prima e dopo un periodo di utilizzo della Realtà Virtuale, dei test optometrici ai partecipanti per misurare i parametri visivi; questo permette di effettuare un confronto per poter valutare se vi è un cambiamento dei parametri visivi dopo una sessione di Realtà Virtuale.

2.1 Accomodazione e vergenze

Il primo tema che si andrà a indagare è lo stato dell'accomodazione e delle vergenze. Sono stati realizzati molteplici studi per capire se il display VR montato sulla testa possa o meno influire: questa volontà di indagare è nata perché alcuni ricercatori hanno ipotizzato che il visore possa mettere in “conflitto” il sistema accomodativo con quello delle vergenze.

Quando si utilizza il visore VR la distanza focale di tutti gli oggetti è costante sullo schermo del display, gli occhi invece devono modificare frequentemente la vergenza, perché gli stimoli vengono presentati con una diversa profondità, senza però modificare l'accomodazione. [20]

Si pensa, inoltre, che questo “conflitto” tra accomodazione e vergenza possa creare un disagio visivo.

Lo studio di Zulekha Mohamed Elias et al., del 2019, indaga se i giochi di Realtà Virtuale possano avere degli effetti sul sistema dell'accomodazione e della vergenza e se vi è un "conflitto" tra essi.

Allo studio hanno partecipato trentacinque soggetti, di cui ventuno sono maschi e tredici sono femmine. Sono stati scelti soggetti con dei prerequisiti precisi: una buona acuità visiva a distanza, anche se raggiunta con l'utilizzo dell'occhiale come metodo di compensazione, una normale visione dei colori, valutata attraverso il test di Ishihara, una buona stereoacuità, il punto prossimo di accomodazione doveva essere al massimo 12,5 cm e un punto prossimo di convergenza con rottura intorno ai 5-7 cm e recupero tra i 7-9 cm.

Per svolgere questo studio è stato utilizzato il VR Shinecon®, Figura.3, con distanza pupillare regolabile. Il visore ha un campo visivo di 90-110° e permette una vista panoramica a 360°.



Figura. 5 VR Shinecon®

Il visore ha una cavità per inserire il proprio smartphone, nello studio è stato utilizzato un Lenovo K6 Power. Il gioco utilizzato è VR Galaxy Wars, disponibile

su PlayStore, ed è un gioco di combattimento; si può vedere la schermata di visione in Figura.6.



Figura. 6 Schermata gioco Galaxy Wars

Prima di far giocare i soggetti, gli studiosi hanno effettuato dei test optometrici per valutare i parametri visivi dei partecipanti.

Sono state eseguite delle misurazioni della risposta accomodativa ed è stato eseguito al forottero il test dei cilindri crociati fusi.

I soggetti hanno giocato per 30 minuti in una sala dove le luci erano state spente per evitare riflessi ed erano stati fatti accomodare su uno sgabello rotante per agevolarli nei movimenti.

Ai partecipanti è stato anche chiesto di riferire qualsiasi sensazione di disagio, come nausea, vertigini e mal di testa.

I risultati dello studio sembrerebbero indicare un aumento medio della risposta accomodativa; i valori pre sessione di gioco sono $0,06 \pm 0,05$ D e dopo la sessione di $0,22 \pm 0,06$ D, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,05$).

Infatti, i valori della risposta accomodativa indicano un aumento del lead accomodativo. Questo potrebbe essere dovuto dal fatto che il sistema visivo si adatta con una certa difficoltà agli stimoli presentati dalla sessione di gioco, dove vengono presentate immagini virtuali a diverse profondità.

Si viene a creare un “conflitto” tra l’accomodazione e le vergenze, appunto per questi stimoli che continuano a mutare durante l’esposizione al gioco.

Inoltre, l’accomodazione rimane costante, perché rimane costante la distanza dello schermo, ma gli stimoli avvengono con profondità diverse influenzando le vergenze.

Per quanto riguarda i sintomi e le sensazioni di disagio la Figura.7 mostra la frequenza dei sintomi.

Si nota che dodici partecipanti su trentacinque hanno riportato di non avere sintomi, mentre il restante lamenta sintomi, i quali sono nausea, headache (mal di testa), dizziness (vertigini). [20]

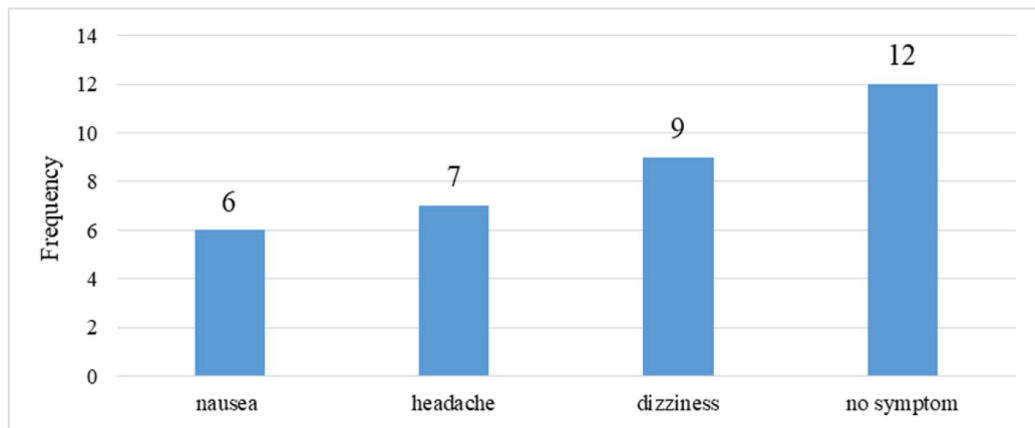


Figura. 7 Frequenza dei sintomi

Anche lo studio effettuato da Alvin J Munsamy et al. ha la volontà di indagare se l’utilizzo del display montato sulla testa causi un “conflitto” tra l’accomodazione e le vergenze.

Questo studio espone che il display montato sulla testa funziona grazie alla disparità delle immagini viste da ciascun occhio, che attivano la percezione della profondità. Le immagini vengono rappresentate a distanze variabili, quindi la convergenza non è costante e si ipotizza che venga a crearsi un “conflitto” tra accomodazione e vergenza, portando così a possibili sintomi come nausea e mal di testa.

Questo studio è mirato a indagare se effettivamente vi sia questo “conflitto” o meno e come cambia la facilità accomodativa e di vergenza da prima a dopo l’esposizione alla Realtà Virtuale.

Quindi lo studio potrebbe essere riassunto con questa domanda di ricerca: il giocare con visori VR HMD ha effetti sulle strutture accomodative e binoculari?

Per rispondere a ciò, sono stati reclutati sessantadue partecipanti, tutti studenti universitari, con un'età compresa tra i 18 e i 30 anni.

Sono stati valutati due gruppi differenti: uno è il gruppo sperimentale, il quale ha effettuato una sessione di gioco utilizzando Samsung Gear VR e l'altro è il gruppo di controllo, il quale ha guardato un film proiettato su uno schermo bidimensionale a un metro.

Entrambi i gruppi sono stati esposti per una durata di 25 minuti.

Inoltre, lo studio è stato svolto in una clinica oculistica di un Dipartimento di Optometria situato nel campus di un'Università sudafricana.

Come prerequisiti i soggetti esaminati dovevano avere una normale funzione visiva binoculare, una distanza interpupillare tra i 55 e 70 mm, non essere portatori di occhiali e di lenti a contatto e avere un punto prossimo di convergenza minore di 10 cm.

Sono stati effettuati dei test pre e post esposizione ed è stata valutata la facilità accomodativa e la facilità di vergenza.

Per svolgere il test per la facilità accomodativa è stata utilizzata una lente sonda personalizzata per ogni partecipante, mentre per misurare la facilità di vergenza è stato utilizzato un flipper da 12^Δ BO e 3^Δ BI.

Per quanto riguarda il gruppo sperimentale la media della facilità di accomodazione è cambiata da 11.14±3.67 cpm a 13.38±3.63 cpm e quella di vergenza da 11.41±3.86 cpm a 15.28±4.93 cpm.

Mentre, per il gruppo di controllo la facilità di accomodazione è passata da 11.70±3.2 cpm a 11.95±3.4 cpm e quella di vergenza da 11.70±3.2 cpm a 11.95±3.4 cpm.

Si è notato che c'è un cambiamento più apprezzabile per quanto riguarda il gruppo sperimentale, ovvero quello che ha usato il visore VR, rispetto al gruppo di controllo ($p < 0,05$).

Questo studio sembra dimostrare che l'utilizzo di questo dispositivo influisce sul sistema accomodazione e vergenza, ma non in modo negativo, e quindi non sembra che un ipotetico conflitto fra accomodazione e vergenza possa compromettere le

performance dei due sistemi, almeno nei tempi di utilizzo della VR testati in questo studio.

Anzi, si nota un aumento della facilità binoculare, come se l'immersione nella Realtà Virtuale possa allenare il sistema visivo per quanto riguarda la dinamica accomodativa e binoculare. Quindi, secondo i ricercatori, si dovrebbe spingere verso ulteriori ricerche che indagano i possibili effetti, ma anche ricerche che possano indagare se il visore VR possa essere utilizzato in campo terapeutico. [21]

Pure lo studio svolto da Hyeon Jeong Yoon et al. indaga l'influenza della Realtà Virtuale sull'accomodazione e sulle vergenze.

In più, viene valutato un confronto di come cambiano alcuni indicatori di accomodazione e di vergenza quando si utilizza la Realtà Virtuale in due condizioni diverse: la modalità immersiva e la modalità non immersiva.

Per svolgere questo studio sono stati reclutati ventitré partecipanti, i quali dovevano avere specifici requisiti un'acuità visiva corretta superiore a 20/20, non avere patologie oftalmologiche, strabismi, ambliopia, malattie della cornea e della retina e non essere stati operati di chirurgia oculare, ad eccezione della chirurgia refrattiva. Inoltre, l'acuità visiva media non corretta era $0,03 \pm 0,04$ logMAR.

Nello studio è stato utilizzato il dispositivo Oculus Rift VR, il quale ha la distanza interpupillare regolabile grazie a un tasto che si trova sul lato destro del dispositivo stesso.

Ai partecipanti è stato chiesto di giocare per 30 minuti a un gioco, Minecraft, in due modalità diverse: immersiva e non immersiva. Tra la sessione di gioco in modalità immersiva e non immersiva è stato fatto passare un periodo di tempo di una settimana.

Nella modalità immersiva il display montato sulla testa riesce a portare l'utente in un ambiente virtuale a 360°, perché ogni suo movimento viene riportato istantaneamente anche nell'ambiente virtuale, il punto di vista del gioco si sposta in base ai movimenti della testa dell'utente, quindi è come se si trovasse fisicamente all'interno del gioco.

Nella Figura.8 si può osservare un esempio di come vede l'utente quando ha il display montato sulla testa.



Figura.8 VR modalità immersiva

Invece nella modalità non immersiva, l'utente si trova in un ambiente statico, ad esempio un soggiorno, mentre guarda l'ambiente VR su uno schermo che è posizionato a una distanza di 2 metri.

Nella Figura.9 si può vedere una simulazione della modalità non immersiva.



Figura.9 VR modalità non immersiva

Ai partecipanti è stata misurata la refrazione tramite un autorefrattometro binoculare a campo aperto, mentre l'ampiezza accomodativa è stata calcolata facendo la differenza tra la refrazione ottenuta monocolarmente durante la visualizzazione di una mira a forma di E di un 1cmX1cm a 33 cm e a 5 metri.

Per quanto riguarda il punto prossimo accomodativo monoculare è stato utilizzato il metodo del push-up. È stata utilizzata come mira una singola lettera alla distanza di circa 50 cm ed è stata avvicinata lentamente al soggetto, finché non ha riferito di vederla sfuocata.

Anche il punto prossimo di convergenza è stato seguito in modo analogo, utilizzato la mira opportuna.

È stato svolta anche la misurazione della stereopsi tramite l'utilizzo del test stereo Fly eseguito alla distanza di 40 cm.

È stato anche determinato l'occhio dominante grazie al test hole-in-the-card.

Lo studio si sofferma ad analizzare se e come cambiano i parametri visivi prima e dopo la sessione di gioco e come cambiano anche in modalità immersiva e non immersiva.

I valori relativi al punto prossimo di accomodazione sembrano indicare un aumento dopo aver utilizzato la Realtà virtuale in modalità immersiva e anche non immersiva.

Infatti, nei test iniziali è stato misurato un punto prossimo di accomodazione di $8,50\pm 3,00$ cm nell'occhio dominante e di $8,50\pm 3,00$ cm nell'occhio non dominante, mentre nei test svolti dopo la sessione di gioco in modalità immersiva si è ottenuto valori di $10,0\pm 3,50$ cm nell'occhio dominante, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p=0,005$) e di $10,00\pm 3,50$ cm nell'occhio non dominante, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p=0,002$).

Mentre, in condizione non immersiva si è misurato inizialmente un punto prossimo di accomodazione di $9,00\pm 3,00$ cm nell'occhio dominante e di $9,50\pm 3,00$ cm nell'occhio non dominante, dopo la sessione di gioco si sono ottenuti come valori $9,50\pm 4,25$ cm nell'occhio dominante, la differenza non sembrerebbe essere significativa ($p=0,058$) e $9,00\pm 4,00$ cm nell'occhio non dominante, la differenza non sembrerebbe essere significativa ($p=0,120$).

Per quanto riguarda il punto prossimo di convergenza si ha un aumento significativo dopo aver utilizzato entrambe le modalità.

È stato misurato inizialmente un punto prossimo di convergenza di $7,00\pm 3,00$ cm, il quale è cambiato in $9,00\pm 3,25$ cm, la differenza sembrerebbe essere significativa ($p=0,001$) in modalità immersiva.

Mentre, in modalità non immersiva, è cambiato da un valore di $8,00\pm 3,00$ cm pre sessione a un valore di $9,00\pm 4,00$ cm, la differenza sembrerebbe essere significativa ($p=0,002$) dopo la sessione di gioco. [22]

Diversamente dagli altri studi, quello svolto da Sung Wook Wee et al. affronta la tematica dell'astenopia causata dall'uso di schermi 3D e ricercando le possibili cause, valuta se una modificazione dell'accomodazione e delle vergenze dopo l'utilizzo di schermi 3D possa essere tra esse.

Per lo studio sono stati arruolati 30 soggetti senza anomalie oftalmologiche che hanno guardato i medesimi display 3D per 30 minuti.

Sono stati effettuati, prima e dopo l'esposizione agli schermi, i seguenti test: il punto prossimo di accomodazione, il punto prossimo di convergenza, le vergenze fusionali, le forie ed è stata valutata la stereopsi.

Dopo l'esposizione è stata condotta anche un'indagine per capire se ci fossero eventuali sintomi soggettivi.

Per poter capire se eventuali sintomi, generati da una sessione con schermi 3D, fossero significativi è stato eseguito lo stesso esperimento con i medesimi partecipanti e gli stessi test svolti sia prima che dopo la sessione utilizzando, però uno schermo 2D.

Così si poteva valutare come cambiavano i sintomi soggettivi con l'utilizzo di schermi 3D e 2D.

Gli studiosi hanno proceduto in questa maniera per avere dei dati confrontabili con l'utilizzo di display 3D e schermi 2D.

Il punto prossimo accomodativo prima di utilizzare sia il display 3D sia il display 2D è risultato essere di $10,48 \pm 1,63$ cm. Dopo l'utilizzo del display 3D è risultato essere di $11,05 \pm 1,94$ cm, la variazione sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,05$), mentre dopo l'utilizzo del display 2D si è ottenuto $10,38 \pm 1,80$ cm, in questo caso la variazione non sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p > 0,05$).

Il punto prossimo di convergenza inizialmente è risultato essere di $6,91 \pm 2,23$ cm; dopo l'utilizzo del display 3D si è ottenuto $7,5 \pm 2,40$ cm, la differenza sembrerebbe essere significativa ($p < 0,05$), mentre con il display 2D si è ottenuto $6,77 \pm 2,69$ cm, la differenza non sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p > 0,05$).

Dai dati ottenuti emerge che il punto prossimo di accomodazione e il punto prossimo di convergenza si sono modificati in modo significativo dopo aver guardato il display 3D rispetto ai display 2D, che non sembrerebbero avere un cambiamento significativo.

Inoltre, anche i sintomi soggettivi indagati sono aumentati in maniera significativa nei soggetti che hanno utilizzato il display 3D ($p < 0,05$). I sintomi che sono stati indagati sono: diplopia, cefalea, bruciore agli occhi, sensazione di occhi secchi e irritati, lacrimazione e vertigini.

Questo studio sembrerebbe dimostrare che vi è un aumento del punto prossimo di accomodazione e di convergenza dovuti a display 3D, ma è un cambiamento non

rilevante dal punto di vista clinico. Quindi, l'astenopia verificata sembrerebbe non essere connessa all'aumento del punto prossimo accomodativo e di convergenza, ma potrebbe essere dovuta ad altri fattori. [23]

2.2 Eteroforia

Il secondo parametro visivo che si andrà a indagare è la foria.

Si riprende lo studio svolto da Zulekha Mohamed Elias et al., nel quale sono stati anche indagati i possibili effetti sulle forie.

Per svolgere questo studio sono state misurate le forie orizzontali e verticali utilizzando la tecnica di Maddox, che prevede l'utilizzo del cilindro di Maddox.

Gli esaminatori hanno quantificato il valore delle forie utilizzando la barra dei prismi.

Inoltre, in questo modo hanno potuto ricavare anche il rapporto AC/A.

Il test della foria è stato eseguito sia prima che dopo l'esposizione al visore VR e i ricercatori hanno così potuto confrontare i dati ottenuti pre e post sessione di gioco.

Da questo confronto si è notato che i valori medi delle forie orizzontali da vicino hanno subito delle variazioni rispetto a quelle da lontano, mentre quelle verticali non hanno avuto differenze statisticamente significative.

I valori di foria orizzontale sembrerebbero, infatti, indicare uno spostamento verso la tendenza exo sia a distanza (i valori pre sessione sono $-0,41 \pm 0,36$ Dp, , mentre quelli post sessione sono $-1,65 \pm 0,32$ Dp, sembrerebbe esserci una differenza statisticamente significativa $p < 0,05$) sia da vicino (i valori pre sessione sono $-3,63 \pm 0,72$ Dp, mentre quelli post sessione sono $-6,56 \pm 0,98$, la differenza sembrerebbe essere significativa $p < 0,05$), da un punto di vista clinico, sembra più rilevante la variazione di foria nel vicino.

Si sono riscontrati dei valori negativi nella media della foria, perché convenzionalmente la exoforia assume dei valori negativi, in quando si intende una tendenza verso la divergenza.

Dunque, si potrebbe assumere che l'esposizione alla Realtà Virtuale porti la foria a una exodeviazione. [20]

Al contrario, lo studio di Suk-Gyu Ha et al. ha riscontrato uno spostamento della foria verso la eso deviazione.

In questo studio sono stati reclutati sessanta partecipanti con età compresa tra i 13 e i 18 anni. I partecipanti hanno guardato per 30 minuti sia un film tridimensionale sia un'applicazione di Realtà Virtuale grazie l'uso di un display montato sulla testa. Gli esaminatori hanno svolto dei test subito prima e dopo dieci minuti della visione del film e dell'utilizzo di Realtà Virtuale.

È stato svolto il test della foria a distanza (6 m) e da vicino (33 cm).

Si è notato un cambiamento della foria verso una esodeviazione (da $0,6 \pm 1,5$ a $0,2 \pm 1,5$ Dp), che sembrerebbe sfiorare, ma non raggiungere la significatività statistica ($p=0,06$). [24]

Un ulteriore studio che sembra dare credito all'osservazione che vi è cambiamento del valore della foria è lo studio svolto di Edyta Karpicka et al.

In questo studio si affronta il tema della foria durante la visione di stimoli stereoscopici 3D e si indaga se e come le forie cambiano quando si osserva uno schermo in 3D e uno in 2D.

Sono stati reclutati 20 partecipanti di età compresa tra i diciannove e quarantacinque anni che per trenta minuti hanno giocato a un gioco al computer in due differenti condizioni: 3D e 2D.

Prima e dopo la sessione di gioco sono state misurate le forie e sono stati confrontati i dati tra il prima e il dopo della sessione e anche tra 3D e 2D.

La foria misurata prima della sessione, è risultata essere di $3,70 \pm 3,70$ Δ, mentre dopo l'utilizzo del display 2D è risultato essere di $4,20 \pm 4,62$ Δ, la differenza sembrerebbe non essere statisticamente significativa ($p=0,16$).

Mentre con l'utilizzo del display 3D si è passati da valori iniziali di $4,55 \pm 3,46$ Δ a $6,05 \pm 3,72$ Δ, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p=0,007$).

Si è riscontrata principalmente una tendenza della foria in exo deviazione.

Questo studio avvalorava quindi l'ipotesi che l'eteroforia cambia e cerca di adattarsi alla visualizzazione di stimoli stereoscopici in 3D. [25]

D'altro canto, lo studio realizzato da Philip RK Turnbull et al., si allontana dagli studi precedenti, in quanto, hanno valutato che dopo l'utilizzo del visore VR non ci sia nessun cambiamento significativo per quanto riguarda la foria.

Per giungere a tali conclusioni, gli studiosi hanno reclutato come partecipanti soggetti con un'età compresa tra i 18 e i 35 anni ed emmetropi o soggetti che correggessero la loro ametropia tramite l'utilizzo abituale di lenti a contatto.

Tutti i partecipanti sono stati sottoposti alla sperimentazione di quattro ambientazioni differenti: ambienti interni sia reali sia virtuali e ambienti esterni sia reali sia virtuali. Le ambientazioni virtuali sono state visualizzate tramite l'utilizzo di un visore VR montato sulla testa.

I partecipanti hanno provato i vari ambienti in giorni diversi, ma in un orario comune e la sessione in ogni ambiente è stata di quaranta minuti.

Sono stati eseguiti dei test prima e dopo ogni ambiente provato. I primi test eseguiti, quindi prima di provare la simulazione, sono stati realizzati dopo un'attività di almeno quarantacinque minuti al computer.

I test eseguiti sono: l'ampiezza accomodativa tramite il push-up test in binoculare, le forie dissociate a distanza (6 metri) e da vicino (40 cm) usando il test di Thorington modificato e la stereopsi.

Nella Figura.10 si possono vedere degli esempi dei quattro ambienti utilizzati nello studio.

La dicitura utilizzata nella Figura.5 serve per descrivere il tipo di ambiente:

- RWO, indica gli ambienti esterni reali;
- VRO, indica gli ambienti esterni virtuali;
- RWI, indica gli ambienti interni reali;
- VRI, indica gli ambienti interni virtuali.

Gli ambienti esterni reali e virtuali erano più luminosi e spaziosi rispetto agli ambienti interni reali e virtuali, i quali erano più deboli e contenuti.



Figura.10 Esempi degli ambienti

Si è notato, alla fine dell'esperimento, che non vi erano differenze significative dei valori tra i test svolti prima e dopo.

I valori medi della foria a distanza misurata prima della sessione erano di: VRI $0,14 \pm 1,59$ Dp, VRO $0,20 \pm 1,55$ Dp, RWI $0,14 \pm 1,63$ Dp, RWO $0,33 \pm 1,89$ Dp, mentre della foria da vicino erano di: VRI $1,66 \pm 3,06$ Dp, VRO $1,79 \pm 2,46$ Dp, RWI $0,14 \pm 2,30$ Dp, RWO $1,29 \pm 2,10$ Dp.

In particolare, per quanto riguarda la foria dissociata orizzontale a distanza (VRI: $-0,22$ SD $0,62\Delta$, VRO: $0,23$ SD $0,84\Delta$, RWI: $-0,30$ SD $0,50\Delta$, RWO: $-0,13$ SD $0,97\Delta$, $p=0,065$) e da vicino (VRI: $0,66$ SD $1,33\Delta$, VRO: $0,53$ SD $0,92\Delta$, RWI: $0,55$ SD $1,56\Delta$, RWO: $0,26$ SD $1,42\Delta$, $p=0,871$) non vi era un cambiamento significativo.

Da questo studio emerge che un'esposizione di 40 minuti a un ambiente VR con il display montato sulla testa sembra avere effetti minimi sul sistema binoculare. [26]

Anche lo studio di Hyeon Jeong Yoon et al, citato precedentemente, sembrerebbe dimostrare che non vi è un cambiamento significativo per quanto riguarda la foria. Per giungere a questa osservazione, gli esaminatori hanno svolto la valutazione della foria tramite l'utilizzo del cover test alternante.

Le misurazioni sono state ripetute tre volte e i risultati riportati sono il valore medio delle misurazioni.

Tutti i test sono stati eseguiti prima e dopo la sessione di gioco.

Non si ha una differenza significativa per quanto riguarda i valori relativi alla foria. La Realtà Virtuale sembrerebbe non avere influenza sulla foria, infatti, in modalità immersiva, è stato misurato inizialmente un valore di $2,00 \pm 8,00$ Dp e dopo la sessione un valore di $2,00 \pm 8,00$ Dp, la differenza sembrerebbe essere non significativa ($p=0,086$), mentre in modalità non immersiva si ha prima un valore di $5,00 \pm 8,00$ Dp a un valore di $5,00 \pm 8,00$ Dp, dopo la sessione di gioco, la differenza sembrerebbe non essere statisticamente non significativa ($p=0,257$). [22]

2.3 La refrazione

L'ultimo parametro visivo analizzato è la refrazione.

Penso sia interessante soffermarsi a indagare se la refrazione possa avere dei mutamenti causati dall'utilizzo della Realtà Virtuale.

Lo studio svolto da Hyeon Jeong Yoon et al., precedentemente citato, indaga anche se l'utilizzo del visore VR possa influenzare la refrazione dell'utente.

In questo studio sono stati reclutati dei partecipanti con una buona acuità visiva ($0,03 \pm 0,04$ logMAR) ed è stata misurata la refrazione tramite l'utilizzo di un autorefrattometro binoculare a campo aperto.

La refrazione è stata misurata anche dopo l'esposizione alla Realtà Virtuale e si sono confrontati i dati pre e dopo la sessione di gioco.

Si è potuto notare che la refrazione non ha subito un cambiamento statisticamente significativo tra la refrazione misurata prima della sessione di gioco (occhio dominante: $-0,38 \pm 0,63$ D, occhio non dominante: $-0,19 \pm 0,81$ D) e dopo la sessione di gioco (occhio dominante: $-0,25 \pm 0,50$ D, la differenza non sembrerebbe essere statisticamente significativa $p=0,935$, occhio non dominante: $-0,13 \pm 0,81$ D, la differenza sembrerebbe non essere statisticamente significativa $p=0,654$) in modalità immersiva.

Anche in modalità non immersiva la refrazione non ha una variazione significativa dalla sessione pre gioco occhio dominante: -0.38 ± 0.63 D, occhio non dominante: -0.25 ± 0.88 D) alla post sessione (occhio dominante: -0.25 ± 0.63 D, la differenza non sembrerebbe essere statisticamente significativa $p=0,261$, occhio non dominante: -0.25 ± 0.63 D, la differenza non sembrerebbe essere statisticamente significativa $p=0,881$).

Questo studio sembrerebbe dimostrare che l'utilizzo di un visore VR non induca una variazione significativa sulla refrazione. [22]

Invece, lo studio di Suk-Gyu Ha et al., citato precedentemente, ha riscontrato che vi è un cambiamento nella refrazione del soggetto dopo l'utilizzo di un display montato sulla testa, ma questo è solo un effetto momentaneo.

È stata misurata la refrazione, la quale è stata misurata oggettivamente tramite l'utilizzo di autorefrattometro, ed è stata riportata come valore di equivalente sferico e la misura è stata ripetuta ogni 10 minuti, dopo l'utilizzo del visore VR, se si notava uno shift miopico maggiore di 0,15 D.

Un aspetto interessante che si è notato, subito dopo l'utilizzo del display montato sulla testa, un transitorio shift miopico dal 17,2% al 30%. I dati sono tornati ai valori iniziali entro 40 minuti dopo l'utilizzo del display.

Questo studio non ha verificato la presenza di effetti rilevanti, in quanto il cambiamento refrattivo riscontrato è risultato essere solo transitorio. [24]

Lo studio svolto da Philip RK Turnbull et al., prende anche in considerazione il fatto che il visore HMD possa fornire uno stimolo per lo sviluppo della miopia.

Da tempo è stata riconosciuta un'associazione tra il lavoro da vicino e lo sviluppo della progressione miopica.

In questo studio tramite l'utilizzo dell'OCT è stato misurato lo spessore della coroide, in quanto un suo aumento è associato a una ridotta velocità di progressione miopica, mentre se si verificasse una diminuzione dello spessore, verrebbe associata ad allungamento dell'occhio e sviluppo di miopia.

Pertanto, il monitoraggio di eventuali cambiamenti nello spessore coroidale a seguito di uno stimolo visivo potrebbe fornire una previsione tempestiva se lo stimolo portasse alla miopia.

Le misure dello spessore coroidale medio, eseguite prima e dopo la sessione di gioco, sono state calcolate per le regioni subfoveale (centrale 1 mm), parafoveale (3 mm) e perifoveale (6 mm).

Prima dell'esposizione, i valori medi dello spessore coroidale risultavano essere: subfoveale: $294,1 \pm 95,4$ μm , parafoveale: $292,8 \pm 89,3$ μm , perifoveale: $280,0 \pm 78,2$ μm .

Dopo l'esposizione si è riscontrato una differenza statisticamente significativa nella variazione di spessore coroidale subfoveale tra i diversi ambienti (VRI: $+13,9\pm 3,3$ μm , VRO: $+9,3\pm 3,2$ μm , RWI: $+0,5\pm 4,4$ μm , RWO: $+2,1\pm 4,3$ μm , $p < 0,001$); l'aumento subfoveale dopo l'esposizione agli ambienti virtuali era maggiore rispetto dopo l'esposizione agli ambienti reali ($p < 0,005$).

Per quanto riguarda le regioni parafoveali ($+14,6\pm 4,5$ μm , VRO: $+9,0\pm 8,3$ μm , RWI: $-1,2\pm 4,4$ μm , RWO: $+1,2\pm 5,1$ μm , $p < 0,001$); si è notato che l'aumento parafoveale dopo l'esposizione agli ambienti virtuali era maggiore rispetto agli ambienti reali ($p < 0,005$).

Si è riscontrata una variazione statisticamente significativa anche per quanto riguarda le regioni perifoveali (VRI: $12,5\pm 7,8$ μm , VRO: $7,2\pm 10,4$ μm , RWI: $-0,4\pm 6,8$ μm , RWO: $-1,0\pm 7,6$ μm , $p < 0,001$); l'aumento perifoveale dopo l'esposizione a VRI era maggiore rispetto agli altri ambienti ($p < 0,005$).

Come si può notare dai dati, i cambiamenti di spessore si sono verificati principalmente negli ambienti virtuali (RVI, VRO) rispetto agli ambienti reali (RWI, RWO).

Dallo studio emerge che si è verificato un ispessimento coroidale significativo (≈ 10 micron) dopo l'esposizione agli ambienti virtuali, quindi la variazione coroidale osservata sembrerebbe suggerire che un visore VR potrebbe non essere uno stimolo miopico. [26]

CAPITOLO III

In questa tesi, si ritiene interessante, dopo aver esposto come la Realtà Virtuale possa influire sul sistema visivo, indagare se tale tecnologia possa essere utilizzata in ambito optometrico.

Una prima applicazione indagata è se può essere sfruttata per agevolare, in qualche modo, il lavoro all'interno di un negozio di Ottica.

È emerso che esiste il Nautilus™ di Essilor, che è il primo dispositivo che permette al cliente di testare le lenti oftalmiche virtualmente.

Una volta che il professionista ha concluso la visita e ha valutato la correzione che meglio compensa il cliente, può fargliela provare attraverso l'uso di questo visore. Questa potrebbe essere una strategia interessante per far testare al cliente se trova ottimale la visione e il comfort della correzione oftalmica proposta. [27]

Un'altra applicazione interessante della Realtà Virtuale è se può essere utilizzata come mezzo di terapia, quindi se possa essere sfruttato per migliorare le abilità visive di un soggetto, che può presentare delle problematiche o delle carenze.

Si è riscontrato che la Realtà Virtuale può essere utilizzata per eseguire un allenamento visivo in soggetti ambliopi. [28]

Innanzitutto, bisogna definire il significato del termine “ambliopia”. Etimologicamente, la parola “ambliopia” deriva dal greco antico: *ἀμβλυωπία*, che significa “debolezza della vista”. Infatti, la parola *ἀμβλυωπία* è l'unione della parola *ἀμβλός*, debole e *ὄψις*, *ὄπός*, vista. [5]

Con la parola ambliopia, che comunemente viene chiamata anche “occhio pigro”, si intende una riduzione della capacità visiva, prevalentemente centrale, senza la presenza di alterazioni o anomalie strutturali dell'occhio.

Questa condizione si presenta approssimativamente nel 3% dei soggetti. Clinicamente, si definisce ambliopia quando vi è una significativa differenza tra le massime acuità visive (MAV) dei due occhi superiore ai 3/10 o una MAV inferiore ai 3/10.

Perché si manifesti questa condizione, deve avvenire una privazione della capacità di vedere in uno dei due occhi, infatti, l'ambliopia è solitamente unilaterale.

La causa di questa privazione si deve manifestare in un periodo, detto periodo critico, che approssimativamente va dalla nascita fino ai primi 6/8 anni circa di vita. Questo periodo viene definito "critico" perché in questo lasso di tempo il sistema visivo si sta sviluppando ed è fortemente plasmabile. Finito questo periodo il sistema visivo è ancora plastico, ma in maniera molto più ridotta, quindi difficilmente si possono modificare delle connessioni o delle alterazioni già formate nel periodo critico. [1]

È fondamentale, perché si sviluppi in modo adeguato la visione, una corretta stimolazione visiva, ovvero le immagini devono essere correttamente focalizzate a livello retico e deve esserci una somiglianza tra le immagini retiniche di entrambi gli occhi. Se ciò non avviene e vi è un'anomala interazione tra i due occhi, questo può essere considerato un fattore ambliogenico.

È importante intervenire tempestivamente nel trattamento dell'ambliopia, per cercare di migliorare questa condizione e recuperare l'occhio ambliope, per permettere al soggetto di utilizzare in maniera adeguata entrambi gli occhi.

Il trattamento rieducativo dell'ambliopia consiste nello stimolare l'occhio ambliope, riducendo l'input visivo nell'occhio fissante.

Una tecnica terapeutica è l'occlusione, ovvero si copre l'occhio fissante per stimolare la visione dell'occhio ambliope. L'occlusione può essere parziale o completa e avviene tramite l'utilizzo di cerotti o filtri semitrasparenti.

Esiste anche la tecnica della penalizzazione, ovvero si utilizzano di lenti oftalmiche come sovracorrezione positiva nell'occhio fissante.

Queste sono tecniche utili nei bambini in una fascia d'età che rientra nel periodo critico, perché il sistema visivo, non essendo ancora del tutto sviluppato ed essendo ancora malleabile, può essere rieducato alla corretta visione. [1]

Invece, quando si parla di adulti, il trattamento è più complicato perché ormai il sistema visivo è del tutto sviluppato e risulta essere rigido.

Un metodo terapeutico che si sta sperimentando è l'allenamento visivo dicoptico con l'utilizzo della Realtà Virtuale, il quale consiste di far indossare al partecipante il visore VR per visualizzare il mondo virtuale ricreato.

Tale ambientazione è suddivisa in due immagini distinte, una vista dall'occhio fissante e l'altra dall'occhio ambliope, questo per poter ottenere una partecipazione di entrambi gli occhi. [29]

È stato condotto uno studio per valutare la potenzialità di questo allenamento visivo. Sono stati reclutati diciassette soggetti, tra cui dieci sono maschi e 7 sono donne, i quali hanno un'età compresa tra i 17 e i 69 anni, con un'età media di 31,2 anni.

Sono stati inclusi nello studio solo soggetti con un'ambliopia anisometrica e disposti a svolgere l'allenamento visivo.

Con l'ambliopia di origine anisometrica la causa risiede nel fatto che la corteccia non è in grado di fondere insieme le due immagini retiniche, perché hanno due grandezze diverse dovute a due difetti refrattivi di entità differenti tra i due occhi. Quindi il cervello attua, come meccanismo di difesa, la soppressione dell'occhio che presente l'immagine retinica meno nitida, ovvero quella che corrisponde all'occhio una maggiore entità di difetto refrattivo. [1]

La migliore acuità visiva corretta è stata misurata attraverso l'utilizzo di un display a cristalli liquidi calibrato (LCD), nel quale veniva mostrato all'utente l'ottotipo di Snellen.

Inoltre, è stata misurata anche la stereoacuità proponendo lo Stereo Randot test, in grado di misurarla da 400 a 20 secondi d'arco.

Sia la migliore acuità visiva corretta sia la stereoacuità sono state misurate prima e dopo l'utilizzo del programma di allenamento dicoptico.

Questo allenamento è stato basato su un gioco per computer Diplopia Game (Vivid Vision), il quale veniva eseguito tramite l'utilizzo del display di Realtà Virtuale montato sulla testa. Per la precisione è stato utilizzato l'Oculus Rift OC DK2.

Erano disponibili due giochi diversi:

- Un gioco spaziale, nel quale i soggetti dovevano far volare un'astronave attraverso un sistema di anelli;
- Un gioco breaker, ovvero una specie di gioco block breaker, ma giocato in una ambientazione 3D.

Entrambi i giochi hanno un'ambientazione dicoptica, con la parte centrale dell'immagine diversa.

Infatti, nel gioco ambientato nello spazio, l'astronave era visibile solo dall'occhio fissante, mentre i cerchi e gli asteroidi erano visibili solo con l'occhio ambliope.

Questo viene fatto, perché se tutti gli oggetti presenti nel gioco fossero presenti solo con un occhio, il soggetto potrebbe occludere l'occhio che non vede gli oggetti e "barare" durante il test.

Invece, suddividendo gli oggetti visibili tra i due occhi, il soggetto è obbligato a tenerli entrambi aperti ed utilizzarli contemporaneamente per poter giocare.

Nella Figura.11 si può vedere un esempio dell'ambientazione virtuale utilizzata per l'allenamento dicoptico visto attraverso il display montato sulla testa.

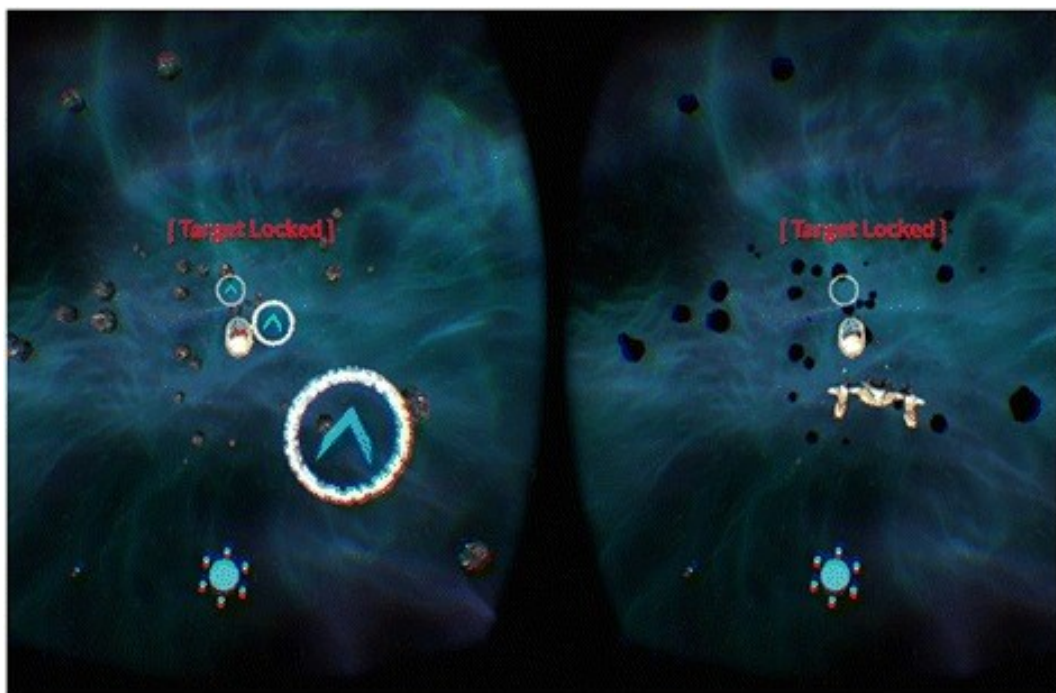


Figura.11 Ambientazione

L'occhio ambliope vede la metà sinistra della schermata, nel quale si vedono i cerchi attraverso i quali si deve cercare di far passare l'astronave e si possono vedere anche gli asteroidi.

Mentre nella schermata a destra, si vede l'astronave che si viene vista solo dall'occhio fissante.

Ogni partecipante ha svolto otto sessioni di allenamento, che venivano svolte due volte a settimana. In ogni sessione venivano usati i due giochi per una durata di 20 minuti ciascuno, quindi per un tempo totale di 40 minuti.

Inoltre, prima e dopo ogni sessione di allenamento veniva misurata ai partecipanti la miglior acuità visiva corretta.

È importante specificare, che nessun partecipante, durante tutto il tempo in cui ha fatto parte a questo studio, ha eseguito nessun altro training visivo.

Una volta finite tutte le otto sessioni di allenamento gli esaminatori hanno potuto raccogliere tutti i dati e confrontare i valori ottenuti pre e post allenamento, per poter valutare se vi sia stato un miglioramento.

Prima dell'allenamento l'equivalente sferico medio era $+2,01 \pm 4,07$ D per quanto riguarda l'occhio ambliope e $+0,09 \pm 2,13$ D per quanto riguarda il controlaterale.

Dopo aver completato l'allenamento si è notato un miglioramento significativo della miglior acuità visiva corretta (BCVA) nell'occhio ambliope, che, prima di iniziare tale allenamento il valore medio era di $0,58 \pm 0,35$ logMAR, mentre dopo l'allenamento era di $0,43 \pm 0,38$ logMAR, la differenza sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,01$).

Nella Figura.12 si può osservare come si è modificato l'andamento della migliore acuità visiva corretta durante tutto l'allenamento e si può anche visualizzare il confronto pre e post allenamento di ciascun partecipante.

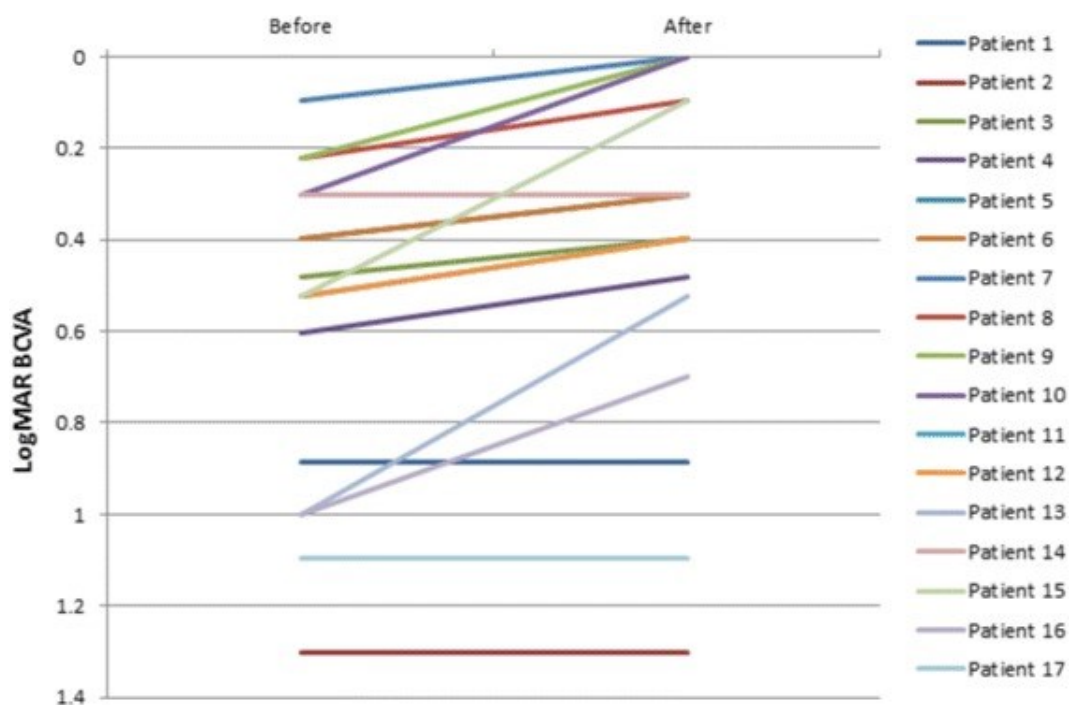


Figura.12 Andamento migliore acuità visiva corretta

È stata valutata anche la stereoacuità, la quale inizialmente era, in media, di $263,3 \pm 135,1$ secondi d'arco, mentre dopo l'allenamento risultava essere, in media, di $176,7 \pm 152,4$ secondi d'arco. Questo cambiamento sembrerebbe essere statisticamente significativo ($p < 0,01$). Questo starebbe a indicare che vi è stato un miglioramento.

Nella Figura.13 si può osservare l'andamento delle misurazioni della stereoacuità di ciascun soggetto per tutta la durata dell'allenamento.

Si può notare, inoltre, che due partecipanti non hanno avuto nessun miglioramento una volta concluso l'allenamento.

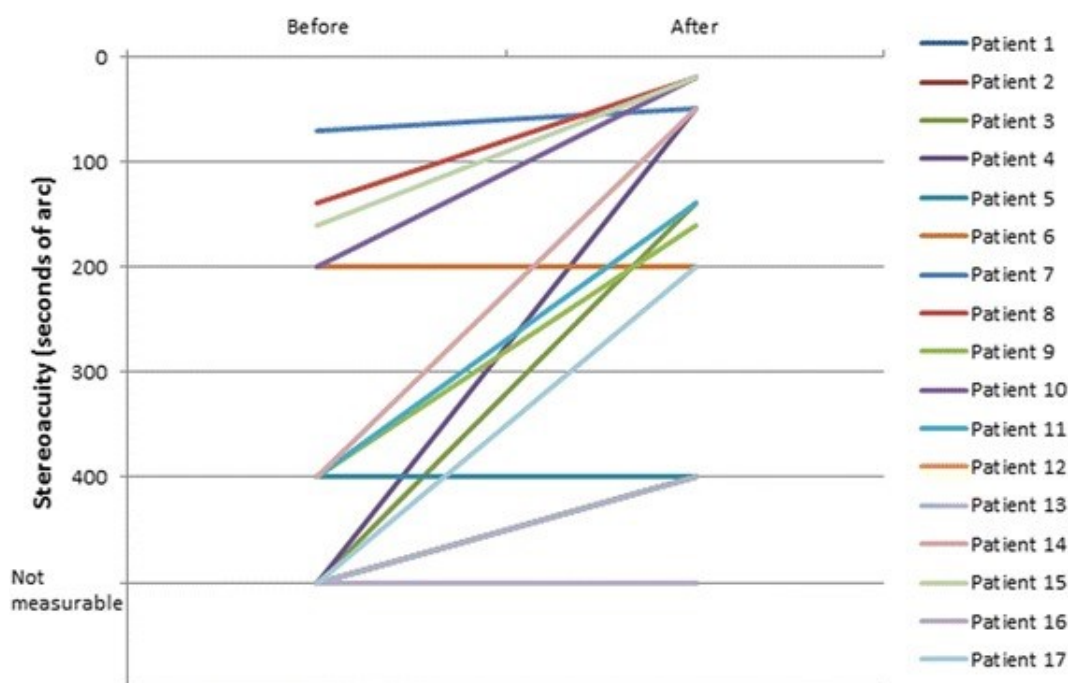


Figura. 13 Andamento stereoacuità

Questo studio sembrerebbe dimostrare il potenziale di questo allenamento dicoptico utilizzando un display di Realtà Virtuale montato sulla testa per il trattamento dell'ambliopia in età adulta. [28]

Un'ulteriore applicazione interessante è se la tale tecnologia possa essere usata come ausilio per soggetti ipovedenti.

Per prima cosa si definisce il concetto di ipovisione: l'Organizzazione Mondiale della Sanità definisce come ipovidente una persona affetta da minorazioni visive anche dopo trattamento, inteso come terapia medica, o correzione standard, intesa

come compensazione oftalmica o con lenti a contatto. L'ipovedente anche con la miglior correzione non riesce a raggiungere delle prestazioni visive che gli consentono una normale autonomia.

Infatti, presenta visus compreso tra 0.3 e percezione luce, oppure con campo visivo minore 10°. Ma che può fare uso del residuo visivo, per quanto possibile, per programmare o eseguire un determinato compito. [30]

La Legge italiana regola l'ipovisione con la Legge 3 aprile 2001, n°138: "Classificazione e quantificazione delle minorazioni visive e norme in materia di accertamenti oculistici":

- ART. 2, definisce i ciechi totali come:
 - a) coloro che sono colpiti da totale mancanza della vista in entrambi gli occhi;
 - b) b) coloro che hanno la mera percezione dell'ombra e della luce o del moto della mano in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore;
 - c) c) coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 3 per cento.
- ART. 3, definisce i ciechi parziali come:
 - a) coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 1/20 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione;
 - b) b) coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 10 per cento.
- ART. 4, definisce gli ipovedenti gravi come:
 - a) coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 1/10 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione;
 - b) b) coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 30 per cento.
- ART. 5, definisce gli ipovedenti medio-gravi come:
 - a) coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 2/10 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione;
 - b) b) coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 50 per cento.
- ART. 6, definisce gli ipovedenti lievi come:
 - a) coloro che hanno un residuo visivo non superiore a 3/10 in entrambi gli occhi o nell'occhio migliore, anche con eventuale correzione;
 - b) b) coloro il cui residuo perimetrico binoculare è inferiore al 60 per cento.

[31]

L'ipovisione comporta delle limitazioni per quanto riguarda le normali attività della vita quotidiana, infatti potrebbero riscontrare delle difficoltà a leggere, riconoscere i volti, identificare gli oggetti, nelle attività da svolgere da vicino.

Questo avviene anche perché i soggetti ipovedenti presentano dei deficit del campo visivo, infatti è importante svolgere un esame del campo visivo per determinare la presenza degli scotomi e la loro posizione e dimensione.

Vi può essere un deficit centrale del campo visivo, che comporta una notevole difficoltà nelle operazioni che richiedono la massima discriminazione, come la lettura, il riconoscimento dei volti.

Riescono, però, a mantenere una minima autonomia di movimento sfruttando la parte periferica del campo visivo.

Questo avviene, ad esempio, quando la causa dell'ipovisione del soggetto è una maculopatia, quindi una malattia che riguarda la porzione dedicata alla visione centrale, come la Degenerazione maculare legata all'età.

Oppure vi è un deficit periferico del campo visivo, che comporta un'alterazione della capacità di movimento e orientamento nell'ambiente e di percepire gli stimoli in movimento.

Questa condizione si verifica, ad esempio, quando la causa è la retinite pigmentosa, la quale è un'atrofia dei bastoncelli ereditaria. [30]

Le persone con ipovisione solitamente utilizzano dispositivi per ipovisione, che vengono scelti in base alle necessità di ogni singolo soggetto.

Tuttavia, questi dispositivi possono avere delle limitazioni come livelli di ingrandimenti fissi, campi visivi ridotti, distanza di lavoro ridotta. [32]

Negli studi recenti si sta indagando nuove possibili tecnologie da potere utilizzare per agevolare le persone ipovendenti.

Una tecnologia che potrebbe essere utilizzata è la Realtà Aumentata, la quale è una tecnologia avanzata che si basa sulla Realtà Virtuale.

Il principio di funzionamento della realtà Aumentata è che l'ambiente reale venga catturato tramite la fotocamera di un dispositivo, ad esempio uno smartphone, e venga inviato a un software che rielabora le immagini per poter creare un contenuto aumentato. Quest'ultimo verrà visualizzato sullo schermo del display dello

smartphone usato. Il dispositivo smartphone può essere inserito nella cavità presente in alcuni visori montanti sulla testa. [32]

È stato condotto uno studio per poter analizzare un eventuale miglioramento dell'acuità visiva nei pazienti con ipovisione utilizzando un dispositivo di Realtà Aumentata.

Sono stati reclutati 100 pazienti, tra cui 74 erano maschi e 26 erano femmine, l'età media era di 36 anni.

Tra i 100 pazienti selezionati per lo studio, il 21% dei pazienti presentava una perdita del campo visivo centrale, il 35% presentava una perdita del campo visivo periferico e il 44% aveva una visione offuscata.

I pazienti sono stati sottoposti a un esame dell'acuità visiva, per valutare l'acuità visiva da lontano è stata utilizzata l'ottotipo di Bailey Lovie, mentre da vicino è stato utilizzato il MNREAD.

La migliore acuità visiva corretta è stata valutata utilizzando sia gli ausili per l'ipovisione e sia Samsung Gear AR.

Il dispositivo Samsung Gear VR viene utilizzato in associazione a uno smartphone che viene inserito nella cavità dello stesso dispositivo. È stata utilizzata un'applicazione, Relumino, scaricabile nello smartphone, che permetteva la rielaborazione delle immagini che venivano inquadrare attraverso la fotocamera posteriore dello smartphone. Queste immagini potevano essere elaborate in base alle esigenze del paziente, infatti si poteva agire sull'ingrandimento dell'immagine, sul contrasto, il livello di luminosità e il colore. In questo studio, però, l'unico parametri di modifica utilizzato è stata il variabile ingrandimento delle immagini. Mentre l'ausilio per l'ipovisione è stato determinato in base alle singole esigenze di ciascun paziente. Gli ausili utilizzati erano lenti di ingrandimento a mano e monitor ingrandenti.

L'acuità visiva mediana a distanza misurata era di 0,9 logMar. Successivamente è stata misurata con l'utilizzo dell'ausilio per ipovedenti e del dispositivo Samsung Gear AR, per valutare se vi era un miglioramento della visione delle lettere dell'ottotipo grazie all'ingrandimento delle immagini da parte dei dispositivi.

Con l'utilizzo di un ausilio per ipovedenti i soggetti sono riusciti a vedere le lettere dell'ottotipo di $0,8 \pm 0,6$ logMar e con l'utilizzo del dispositivo Samsung Gear AR

di $0,2 \pm 0,3$ logMar. La differenza delle lettere lette sull'ottotipo con l'utilizzo degli ausili e del dispositivo Samsung Gear VR sembrerebbe essere statisticamente significativa ($p < 0,0001$).

Invece, per quando riguarda l'acuità visiva mediana da vicino era di 0,4 logMAR. Con l'utilizzo degli ausili per ipovedenti i soggetti sono riusciti a leggere le lettere dell'ottotipo di $0,3 \pm 0,0$ logMar e con l'utilizzo del dispositivo Samsung Gear AR di $0,1 \pm 0,0$ logMar. Anche in questo caso sembrerebbe esserci una differenza statisticamente significativa ($p < 0,0001$).

Da questo studio sembrerebbe emergere che i dispositivi montanti sulla testa, che sfruttano la tecnologia della Realtà Aumentata potrebbero essere un innovativo aiuto per gli ipovedenti e sembrerebbero essere promettenti nel portare cambiamenti nella qualità della vita dei pazienti con disabilità visiva. [32]

CONCLUSIONI

In conclusione, si è notato che effettivamente ci sono degli effetti visivi strettamente legati all'utilizzo di dispositivi per la Realtà Virtuale, ma gli studi citati non sembrerebbero convergere alle stesse conclusioni. Questo si può notare soprattutto per quanto riguarda l'influenza sullo stato dell'accomodazione e delle vergenze.

Lo studio di Zulekha Mohamed Elias et al., infatti, sembrerebbe dimostrare che viene a crearsi un "conflitto" tra l'accomodazione e la vergenza, poiché i valori riscontrati sembrerebbero indicare un aumento del lead accomodativo, che potrebbe essere dovuto dal fatto che il sistema visivo ha una certa difficoltà ad adattarsi agli stimoli che gli vengono presentati, in quanto le immagini vengono presentate a diverse profondità, portando a un mutamento dello stato delle vergenze, mentre l'accomodazione dovrebbe rimanere costante, poiché rimane costante anche la distanza dello schermo.

Tuttavia, questo "conflitto" risulta essere solo temporaneo, in quanto le misurazioni dei parametri visivi, che erano state effettuate il giorno dopo della sessione di gioco, erano tornati alla normalità.

Al contrario, lo studio Alvin J Munsamy et al. si discosta da questa teoria.

Infatti, in questo studio si riscontra che l'utilizzo della Realtà Virtuale possa essere un mezzo terapeutico, in quanto i valori trovati sembrerebbero indicare un aumento della facilità binoculare.

Quindi, sembrerebbe che l'utilizzo di questa tecnologia influisca in modo positivo sul sistema delle vergenze e dell'accomodazione.

Da questi due studi emergono delle conclusioni diverse, che si potrebbero definire anche opposte.

Si nota un'incongruenza sui possibili effetti, creati dalla Realtà Virtuale, anche per quanto riguarda la foria.

Anche in questo caso si sono riscontrati degli effetti diversi nei differenti studi, ad esempio lo studio di Zulekha Mohamed Elias et al. sembrerebbe indicare che dopo l'utilizzo del visore VR la foria assuma una tendenza alla exo deviazione, anche se questa risulta essere solo un effetto temporaneo.

Mentre altri studi, nello specifico lo studio di Philip RK Turnbull et al. e quello di Hyeon Jeong Yoon, sembrerebbero indicare che la foria non subisca nessuno cambiamento statisticamente significativo.

In più emerge che l'unico risultato comune sembrerebbe quello di aver rilevato differenze clinicamente poco rilevanti.

La divergenza tra le conclusioni degli studi citati potrebbe essere dovuta dal fatto che vi sono molte diversità nella realizzazione degli studi, come l'uso di dispositivi di Realtà Virtuale diversi, una diversa esposizione alla sessione di gioco come anche il compito che doveva essere eseguito dai partecipanti.

Per avere una maggiore chiarezza sui possibili effetti che la tecnologia di Realtà Virtuale possa avere si potrebbero svolgere ulteriori studi che possano essere il più confrontabili possibili.

Invece, per quanto riguarda la refrazione, gli studi riportati sembrerebbero indicare che il visore VR indica una variazione clinicamente poco apprezzabile della refrazione del soggetto.

Lo studio di Suk-Gyu Ha et al. ha riscontrato uno shift miopico, ma è risultato essere solo una condizione transitoria e non una condizione permanente che vada ad alterare la refrazione del soggetto.

È importante considerare che negli studi, che sono stati citati, il tempo massimo di esposizione alla Realtà Virtuale considerato è sempre stato inferiore ad un'ora, quando viene naturale pensare che una persona possa trascorrere molto più tempo a giocare.

Infatti, il videogioco può dare origine a una vera e propria dipendenza, che porta il soggetto a giocare in modo eccessivo.

Quindi, in futuro, potrebbero essere interessanti svolgere degli studi che prendono in considerazione un'esposizione alla Realtà Virtuale più duratura, che prenda in considerazione, che i soggetti potrebbero passare molte più ore a giocare, per potere indagare e valutare gli eventuali effetti annessi.

Inoltre, è importante sottolineare che la tecnologia della Realtà Virtuale sta prendendo un ruolo importante nell'ambito optometrico ed è emerso che è una tecnologia che viene già usata in ambito clinico.

Sono emersi risultati promettenti che mostrano la potenzialità dell'uso della Realtà Virtuale come trattamento terapeutico dell'ambliopia. Infatti, sono stati riscontrati dei risultati che sembrerebbero dimostrare che vi è stato un miglioramento dell'acuità visiva e della stereopsi in soggetti ambliopi.

Sarebbe stato, ulteriormente interessante, poter verificare la durata nel tempo dei miglioramenti ottenuti, tramite un follow-up, che purtroppo ne è privo lo studio.

Un'altra potenzialità è l'utilizzo della Realtà Aumentata per facilitare gli ipovedenti. Infatti, sono stati riscontrati dei notevoli miglioramenti dell'acuità visiva sia a distanza sia da vicino.

Lo studio sembrerebbe indicare che la tecnologia della Realtà Aumentata offra un vantaggio maggiore rispetto ai dispositivi per ipovedenti convenzionali. Infatti, i pazienti, coinvolti nello studio citato, hanno affermato che le immagini che visualizzavano attraverso il dispositivo AR erano molto chiare ed erano piacevolmente colpiti nel potere vedere meglio il mondo reale rispetto a come potevano vederlo a occhi nudi o con l'utilizzo di ausili per l'ipovisione. [32]

Infine, la tesi ha analizzato tutti gli aspetti che mi ero inizialmente prefissata di indagare, riscontrando che vi sono dei risultati divergenti per quanto riguarda gli effetti dovuti alla Realtà Virtuale, ma che essa potrebbe avere un enorme potenziale nel trattare possibili disfunzioni visive, come l'ambliopia oppure nel massimizzare le deboli abilità discriminative nei soggetti ipovedenti.

Inoltre, è una tecnologia che può essere sfruttata con estrema comodità d'utilizzo, visto che basta indossare il visore VR, e potrebbe essere un metodo interessante per invogliare possibili pazienti a svolgere allenamenti terapeutici, come nel caso dell'ambliopia. I soggetti potrebbero trovare stimolante svolgere l'allenamento visto che i test proposti sono piacevoli e sembra di giocare a scopo ludico e non per uno scopo terapeutico.

Sarà di notevole interesse vedere come nel futuro questa tecnologia possa essere ancora più utilizzata e acquisire sempre più autorevolezza nel mondo dell'optometria.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Anto Rossetti, Pietro Gheller; Manuale di Optometria e Contattologia, Zanichelli, 2003.
- [2] Sergio Villani; Optometria e oftalmometrologia, University of Latvia, school of optometry, 1994.
- [3] William J. Benjamin; Borish's Clinical Refraction, Butterworth Heinemann Elsevier, 2006.
- [4] Fabrizio Zeri, Anto Rossetti, Alessandro Fossetti e Antonio Calossi; Ottica visuale, Società Editrice Universo, 2012.
- [5] Franco Montanari; GI Vocabolario della lingua Greca, Loescher, 2009.
- [6] Antonello Satta; Archivio Stereoscopico Italiano, http://www.archiviostereoscopicoitaliano.it/documenti/una_breve_storia_del%203d.pdf.
- [7] Università degli studi Padova; Stereoscopio di Brewster, 2012. <http://divulgazione.fisica.unipd.it/musei-e-mostre/archivio-mostre/gli-strumenti-del-pre-cinema-nel-museo-di-storia-della-fisica/stereoscopio-di-brewster/>.
- [8] Marina Galatioto; Come funziona il 3D senza occhiali, 2011. <https://it.emcelettronica.com/come-funziona-3d-senza-occhiali>.
- [9] Intelligenze Artificiale <http://www.intelligenzaartificiale.it/realta-virtuale/>.
- [10] Andrei Bai; Appunti Digitali, 2010. <https://www.appuntidigitali.it/6895/sensorama-la-realta-virtuale-degli-anni-60/>.
- [11] Virtual reality society, 2017 <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html>.

- [12] .dotacademy; 2018
<https://www.dotacademy.it/il-lato-vintage-della-virtualreality/#:~:text=Tra%20il%201965%20e%20il,delle%20immagini%20generate%20al%20computer.&text=Tutt'ora%20il%20suo%20progetto,padre%20fondatore%20della%20real%C3%A0%20virtuale>.
- [13] Antonio Ravasio; L'impiego dei sistemi di realtà virtuale in psicologia clinica, Scienze dell'interazione, vol. 3, n. 1, 2011.
- [14] Frederick P. Brooks, Jr; What's Real About Virtual Reality?, University of North Carolina at Chapel Hill.
- [15] Micheal Heim; The Metaphysics of Virtual Reality, Oxford University Press, 1993.
- [16] Giulia Cattoni; Education Marketing, 2019.
<https://www.educationmarketing.it/blog/2019/02/nuovi-media-per-nuovi-scenari-il-libro-di-lorenzo-montagna/>.
- [17] Isabella Maremonti; Ingegneria biomedica, 2016.
<https://www.ingegneriabiomedica.org/news/biotech-support/la-realta-virtuale-entra-sala-operatoria-la-chirurgia-diretta/>.
- [18] José Antonio Ponce-Blandón, Inocencio Espejel-Hernández, Macarena Romero-Martin, María de las Mercedes Lomas-Campos, Nerea Jiménez-Picon, Juan Gómez-Salgado; Videogame-related experiences among regular adolescent gamers, Journal PLoS One, 2020.
- [19] Ji-Woo Lee, Hyun Gug Cho, Byeong-Yeon Moon, Sang-Yeob Kim, Dong-Sik Yu; Effects of prolonged continuous computer gaming on physical and ocular symptoms and binocular vision functions in young healthy individuals, PeerJ Journal, 2019.
- [20] Zulekha Mohamed Elias, Uma Mageswari Batumalai, Azam Nur Hazman Azmi; Applied Ergonomics, 2019.
- [21] Alvin J. Munsamy, Husna Paruk, Bronwyn Gopichunder, Anela Luggya, Thembekile Majola, Sneliswa Khulu; The effect of gaming on accommodative and vergence facilities after exposure to virtual reality head-mounted display, Journal of Optometry, 2020.

- [22] Hyeon Jeong Yoon, Jonghwa Kim, Sang Woo Park, Hwan Heo; Influence of virtual reality on visual parameters: immersive versus non-immersive mode, *BMC Ophthalmology*, 2020.
- [23] Sung Wook Wee, Nam Ju Moon, Won Ki Lee, Sohee Jeon; Ophthalmological factors influencing visual asthenopia as a result of viewing 3D displays, *British Journal of Ophthalmology*, 2012.
- [24] Suk-Gyu Ha, Kun-Hoo Na, Il-Joo Kweon, Young-Woo Suh, Seung-Hyun Kim; Effects of Head-Mounted Display on the Oculomotor System and Refractive Error in Normal Adolescents; *Journal of pediatric ophthalmology and strabismus*, 2016.
- [25] Edyta Karpicka, Peter Alan Howarth; Heterophoria adaptation during the viewing of 3D stereoscopic stimuli, *The journal of the British College of Ophthalmic Opticians*, 2013.
- [26] Philip R. K. Turnbull, John R. Phillip; Ocular effects of virtual reality headset wear in young adults, *Scientific Reports*, 2017.
- [27] Essilorluxottica, <https://www.essilorluxottica.com/it>.
- [28] Peter Žiak, Anders Holm, Juraj Halička, Peter Mojžiš, David P. Piñero; Amblyopia treatment of adults with dichoptic training using the virtual reality oculus rift head mounted display: preliminary results, *BMC ophthalmology*, 2017.
- [29] Vivid Vision, SeeVividly <https://www.seevividly.com/>.
- [30] Massimo Fiori; *Fondamenti di ipovisione*, 2020.
- [31] *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Legge 3 Aprile 2001, n. 138.
https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2001-04-21&atto.codiceRedazionale=001G0193&elenco30giorni=false.

- [32] Sarika Gopalakrishnan, Sanjana Chouhan Suwalal, Gnanapoonkodi Bhaskaran, Rajiv Raman; Use of augmented reality technology for improving visual acuity of individuals with low vision, Indian Journal Ophthalmology, 2020.