



Università degli Studi di Salerno

Dipartimento di Informatica

Corso di Laurea Triennale in Informatica

Trattamento di ambliopia e strabismo attraverso gamification e eye tracking con MediaPipe

Relatori

Prof. Fabio Narducci

Dott.ssa Carmen Bisogni

Candidata

Rosalia Fortino

Matricola: 0512113543

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Abstract	1
1 Introduzione	2
1.1 Contesto	2
1.2 Obiettivi	3
1.2.1 Obiettivi principali	3
1.2.2 Sviluppo del sistema di controllo oculare	4
1.2.3 Progettazione dell'interfaccia utente	4
1.2.4 Miglioramento dell'aderenza al trattamento	5
1.2.5 Potenziale esplorativo dell'eye tracking	5
1.3 Ambliopia e strabismo	5
1.3.1 Definizione e manifestazioni cliniche	5
1.3.2 Cause e fattori di rischio	6
1.3.3 Impatto sulle abilità visuomotorie e psicologiche	6
1.3.4 Trattamento	7
1.3.5 Effetti del trattamento	8
1.3.6 Implicazioni economiche	8
1.4 Tecnologie utilizzate	8
1.4.1 Python	9
1.4.2 OpenCV	9
1.4.3 MediaPipe	9
1.4.4 Pygame	10
1.4.5 PyAutoGUI	10
1.5 Struttura della tesi	10
2 Stato dell'arte	12
2.1 Storia e sviluppo del tracciamento oculare	12
2.1.1 Origini	12
2.1.2 Innovazioni tecnologiche	12
2.2 Tecnologia e metodi	13
2.2.1 Metodi di rilevazione	13
2.2.2 Metriche	13
2.3 Applicazioni	14

2.3.1	Ricerca scientifica e psicologica	14
2.3.2	Marketing e ricerca di mercato	14
2.3.3	Interazione uomo-macchina	15
2.3.4	Medicina e oftalmologia	15
2.3.5	Gaming e realtà virtuale	16
2.3.6	Fattori umani e simulazione	16
2.4	Tecniche di computer vision per la terapia visiva	16
2.4.1	Diagnosi	17
2.4.2	Sistemi e tecniche di eye tracking	17
2.4.3	Benefici nell'identificazione delle anomalie del movimento oculare . .	18
2.4.4	Dispositivi e software	19
2.4.5	Realtà virtuale e realtà aumentata	19
2.4.6	Tecniche di computer vision integrate in ambienti VR	20
2.4.7	Algoritmi per la stimolazione visiva personalizzata	20
2.4.8	Algoritmi adattivi	21
2.4.9	Progressi nella personalizzazione delle terapie	21
2.5	MediaPipe	22
2.5.1	Tracciamento e prestazioni	22
2.5.2	Stabilità e accuratezza	23
2.6	Gamification	24
2.6.1	Meccaniche e componenti	24
2.6.2	Impatto sulla salute	24
2.6.3	Applicazioni nella terapia visiva	25
2.6.4	Considerazioni etiche e sicurezza	25
2.7	Giochi per la riabilitazione visiva	26
2.7.1	Vivid Vision	26
2.7.2	AmblyoPlay	26
2.7.3	Dig Rush	27
2.7.4	EyeSwift	27
2.7.5	Tetris dicottico	28
3	Proposta	30
3.1	Descrizione del sistema proposto	30
3.2	Architettura dei giochi	32
3.2.1	Brick Breaker	32
3.2.2	Memory	33
3.3	Implementazione dell'eye tracking con MediaPipe	34
3.3.1	Inizializzazione e configurazione di MediaPipe	34
3.3.2	Elaborazione dei fotogrammi ed estrazione dei punti di riferimento . .	36
3.3.3	Calcolo della posizione degli occhi	37
3.3.4	Calcolo della posizione normalizzata	39
3.3.5	Integrazione con il loop di gioco	39

3.4	Traduzione dei movimenti oculari in azioni di gioco	40
3.4.1	Brick breaker	40
3.4.2	Memory	41
4	Conclusione	44
4.1	Introduzione ai sondaggi	44
4.2	Sintesi dei risultati	44
4.2.1	Sondaggio 1: Accessibilità, usabilità e inclusività dei giochi	44
4.2.2	Sondaggio 2: Predisposizione dei genitori verso la gamification	49
4.3	Analisi dei risultati	54
4.3.1	Accessibilità e usabilità dei giochi	54
4.3.2	Predisposizione dei genitori verso la gamification	55
4.4	Conclusioni finali	55

Elenco delle figure

4.1	Diagramma su comprensione e utilizzo dei giochi	45
4.2	Diagramma sull'intuitività	45
4.3	Diagramma sull'adeguatezza del design	46
4.4	Diagramma su durata dei giochi e affaticamento visivo	46
4.5	Diagramma su livello di difficoltà e frustrazione	47
4.6	Diagramma sulle difficoltà riscontrate	48
4.7	Diagramma sui fattori che contribuiscono all'usabilità	48
4.8	Diagramma sui suggerimenti per il miglioramento	49
4.9	Diagramma sull'aderenza al trattamento	50
4.10	Diagramma sul divertimento nel trattamento	50
4.11	Diagramma su riduzione dello stress e dell'ansia	51
4.12	Diagramma sulla preoccupazione sui benefici a lungo termine	51
4.13	Diagramma su sfide e preoccupazioni	52
4.14	Diagramma sui vantaggi della gamification	53
4.15	Diagramma sull'integrazione della gamification	53
4.16	Diagramma sugli elementi cruciali per il successo della gamification	54

Abstract

L'ambliopia e lo strabismo sono disturbi visivi che in età pediatrica possono essere causa di deficit visivi significativi irreversibili. Spesso trattati con metodi tradizionali come l'uso di occlusori ed esercizi visivi ripetitivi, tali approcci soffrono di una bassa aderenza da parte dei pazienti, specialmente a causa della monotonia e del disagio sociale. Le tecnologie di tracciamento oculare e la *gamification* rappresentano un'alternativa promettente, ma non sono ancora ampiamente utilizzate nella terapia visiva.

Due giochi, nello specifico Brick Breaker e Memory, sono stati sviluppati utilizzando MediaPipe, una piattaforma per la rapida prototipazione di applicazioni basate su Machine Learning che include soluzioni per il rilevamento degli occhi e il tracciamento oculare. I giochi proposti in questo studio offrono una terapia più interattiva e meno invasiva, coinvolgendo i bambini attraverso un'esperienza ludica. La ricerca ha valutato l'efficacia del sistema tramite due sondaggi, uno sull'accessibilità e l'usabilità dei giochi, e l'altro sull'atteggiamento dei genitori verso la gamification.

I risultati mostrano che il sistema è stato giudicato intuitivo e semplice da utilizzare, e i giochi sono stati apprezzati per la loro capacità di mantenere alto l'interesse durante le sessioni di trattamento. Inoltre, i genitori hanno espresso un giudizio positivo sull'integrazione della gamification nel trattamento, ritenendola utile per migliorare la motivazione dei bambini. Tuttavia, sono emerse alcune perplessità sulla durata dell'efficacia a lungo termine.

In conclusione, il sistema proposto ha affrontato con successo i limiti dei metodi tradizionali migliorando l'aderenza al trattamento attraverso un approccio più dinamico e interattivo, aprendo nuove possibilità per la riabilitazione visiva.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Contesto

L'ambliopia e lo strabismo sono disturbi visivi tra i più comuni in età pediatrica e rappresentano una delle principali cause di deficit visivo nei bambini. L'ambliopia, comunemente nota come "occhio pigro", è caratterizzata da una riduzione della capacità visiva in uno degli occhi, che deriva da un alterato sviluppo della visione durante l'infanzia. Questa condizione si verifica quando l'occhio e il cervello non lavorano in sinergia e il cervello favorisce l'occhio dominante, penalizzando quello ambliopico. Il risultato è una perdita di capacità visiva che non può essere corretta tramite occhiali o lenti a contatto, poiché il problema risiede a livello neurovisivo. Secondo studi recenti, circa il 2-3% della popolazione infantile globale è affetta da ambliopia, rendendo questa condizione una delle principali preoccupazioni per gli oftalmologi pediatrici.[1]

Lo strabismo, invece, è una condizione in cui gli occhi non sono allineati correttamente e non riescono a puntare lo stesso oggetto contemporaneamente. Questo disallineamento può essere costante o intermittente, e varia in gravità da un semplice difetto estetico a un disturbo visivo significativo che influisce sulla capacità del bambino di percepire la profondità e coordinare i movimenti con precisione. Se non trattato, lo strabismo può portare a una visione doppia o allo sviluppo di ambliopia. I bambini affetti da queste condizioni spesso manifestano difficoltà nel completare attività quotidiane, come la lettura e il gioco, che richiedono un preciso coordinamento occhio-mano, e possono anche essere soggetti a problemi di autostima e difficoltà sociali a causa della loro condizione visibile.[2]

Tradizionalmente, il trattamento di ambliopia e strabismo si è basato su approcci come l'uso di occlusori, che prevedono la copertura dell'occhio dominante per stimolare l'uso dell'occhio ambliopico, e una serie di esercizi visivi che mirano a rinforzare la muscolatura oculare e a migliorare la coordinazione tra i due occhi.[3] Tuttavia, questi trattamenti, per quanto consolidati, presentano delle criticità, soprattutto in termini di compliance da parte dei bambini. L'uso prolungato di occlusori, ad esempio, risulta spesso scomodo e socialmente stigmatizzante, mentre gli esercizi visivi tradizionali, ripetitivi e monotoni, non riescono a mantenere alto l'interesse e la motivazione dei pazienti più giovani. Questo può portare a un

tasso di abbandono del trattamento piuttosto elevato e, di conseguenza, a un peggioramento della prognosi visiva.[4]

Per affrontare queste sfide, negli ultimi anni si è assistito a una crescente integrazione di tecnologie avanzate come l'eye tracking e la computer vision nelle pratiche riabilitative. L'eye tracking rappresenta una tecnologia all'avanguardia che consente di monitorare in modo preciso e continuo i movimenti oculari del paziente, raccogliendo dati accurati sul comportamento visivo. Questo monitoraggio permette di valutare l'efficacia del trattamento in tempo reale, offrendo la possibilità di adattare e personalizzare gli interventi terapeutici in base ai progressi specifici di ciascun bambino. L'eye tracking, inoltre, ha il vantaggio di rendere i trattamenti più dinamici e interattivi, favorendo una maggiore partecipazione e coinvolgimento da parte dei pazienti.[5]

Parallelamente, la computer vision consente l'elaborazione in tempo reale delle immagini catturate dai dispositivi di tracciamento oculare, creando ambienti visivi interattivi che rispondono ai movimenti oculari del paziente. Ciò offre la possibilità di sviluppare esperienze ludiche che rendono la terapia visiva non solo più efficace, ma anche più divertente e stimolante, trasformando una pratica terapeutica noiosa e ripetitiva in un'attività che i bambini trovano interessante e coinvolgente. Le applicazioni di queste tecnologie nella riabilitazione visiva rappresentano un notevole progresso rispetto alle metodologie tradizionali, aprendo nuove prospettive nel campo della terapia dell'ambliopia e dello strabismo.[6]

In questo contesto è di fondamentale importanza MediaPipe, una piattaforma sviluppata da Google. MediaPipe fornisce strumenti avanzati per il tracciamento oculare utilizzando la computer vision, rendendo possibile l'implementazione del controllo oculare in tempo reale all'interno di applicazioni interattive.[7] Grazie alla sua capacità di integrare facilmente il tracciamento oculare in giochi e altre attività visive, MediaPipe rappresenta una soluzione particolarmente adatta per il trattamento di disturbi visivi nei bambini, dove l'aspetto ludico è cruciale per mantenere alta la motivazione. In particolare, la piattaforma consente di creare giochi terapeutici che non solo migliorano la capacità visiva attraverso l'esercizio costante, ma monitorano anche i progressi del paziente in modo continuo e non invasivo.

L'adozione di queste tecnologie nel contesto della riabilitazione visiva non solo risponde alla necessità di migliorare l'efficacia del trattamento, ma rappresenta anche un cambiamento di paradigma nel modo in cui queste terapie vengono progettate e implementate. Attraverso un approccio più interattivo e personalizzato, è possibile ridurre il tasso di abbandono del trattamento e migliorare i risultati a lungo termine, garantendo che i bambini possano beneficiare di terapie più efficaci e meno invasive.[8]

1.2 Obiettivi

1.2.1 Obiettivi principali

L'obiettivo principale di questa tesi è progettare e sviluppare due giochi interattivi, Brick Breakers e Memory, sfruttando l'eye tracking come strumento di controllo e supporto terapeutico per i bambini affetti da ambliopia e strabismo. Questi giochi sono concepiti per

trasformare la riabilitazione visiva in un'attività coinvolgente e motivante, mirando a migliorare l'aderenza al trattamento e a mantenere alta la partecipazione dei bambini. La scelta dei giochi Brick Breakers e Memory è strategica: entrambi presentano meccaniche semplici ma efficaci nello stimolare l'attenzione e il controllo oculare, elementi cruciali nel processo di riabilitazione visiva.

1.2.2 Sviluppo del sistema di controllo oculare

Un primo obiettivo specifico è lo sviluppo di un sistema di controllo oculare completamente integrato nei giochi. Questo sistema deve consentire ai bambini di interagire con i giochi utilizzando esclusivamente i movimenti oculari. La calibrazione precisa del tracciamento oculare è fondamentale per garantire che i movimenti siano riconosciuti con accuratezza e tradotti in comandi di gioco fluidi. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario ottimizzare la tecnologia di tracciamento fornita da MediaPipe, assicurando che risponda in modo intuitivo e preciso ai movimenti oculari dei bambini. Un aspetto cruciale di questo obiettivo è l'ergonomia dell'interazione: il sistema deve risultare naturale e spontaneo, evitando la sensazione di un esercizio terapeutico forzato e creando un ambiente di gioco che stimoli un utilizzo prolungato e ripetuto nel tempo.

1.2.3 Progettazione dell'interfaccia utente

Il secondo obiettivo è la progettazione di un'interfaccia utente che sia altamente usabile e inclusiva. L'usabilità, un concetto che si riferisce alla facilità d'uso e all'accettabilità di un prodotto, è essenziale per garantire che il gioco sia accessibile e non frustrante per i bambini con disturbi visivi. La definizione di usabilità è complessa e multifaccettata: secondo le definizioni correnti, include la facilità d'uso e l'accettabilità del prodotto da parte di una classe specifica di utenti che svolgono compiti specifici in un determinato ambiente. La facilità d'uso è determinata dalle caratteristiche del prodotto, come lo stile dell'interfaccia e la struttura del dialogo, e viene misurata attraverso indicatori di prestazione e soddisfazione degli utenti. L'accettabilità, d'altra parte, si riferisce a quanto il prodotto sarà effettivamente utilizzato nella vita reale, ed è influenzata dal contesto d'uso e dalle caratteristiche degli utenti.

Per garantire una buona usabilità, è necessario che l'interfaccia di gioco sia progettata tenendo conto delle specifiche esigenze dei bambini. Questo include la progettazione di un'interfaccia semplice, intuitiva e visivamente chiara, che minimizzi l'affaticamento mentale e fisico. La complessità dell'interfaccia deve essere ridotta al minimo per evitare frustrazioni e garantire che i bambini possano interagire con il gioco senza difficoltà. La progettazione deve considerare anche le limitazioni visive e cognitive dei bambini, assicurandosi che l'esperienza di gioco rimanga stimolante ma gestibile. Per ottenere ciò, è fondamentale un design centrato sull'utente, che prenda in considerazione le esigenze e le capacità di questo gruppo specifico di utenti durante tutte le fasi del processo di sviluppo.[9]

1.2.4 Miglioramento dell'aderenza al trattamento

Un ulteriore obiettivo è migliorare l'aderenza al trattamento, che è spesso una sfida nella riabilitazione visiva. L'integrazione dell'eye tracking e della computer vision nei giochi terapeutici mira a migliorare la motivazione e l'interesse dei bambini. I giochi devono essere progettati per offrire feedback immediato e gratificazioni che incentivino i bambini a partecipare regolarmente alla terapia. Elementi ludici, come premi virtuali e livelli di difficoltà crescenti, possono rendere il trattamento meno monotono e più coinvolgente, incoraggiando i bambini a completare le sessioni con entusiasmo e costanza. Questo approccio non solo riduce il rischio di abbandono del trattamento, ma può anche contribuire a migliorare i risultati terapeutici complessivi.[8]

1.2.5 Potenziale esplorativo dell'eye tracking

Infine, un obiettivo esplorativo è investigare il potenziale dell'eye tracking e della computer vision per creare nuove modalità di riabilitazione visiva. La ricerca si propone di valutare non solo l'efficacia di queste tecnologie nei giochi riabilitativi, ma anche come esse possano contribuire all'evoluzione delle attuali pratiche terapeutiche. Sebbene questa tesi non preveda una fase di sperimentazione clinica, i risultati ottenuti forniranno una base solida per futuri studi empirici e applicazioni cliniche su larga scala. L'integrazione di tecnologie avanzate come l'eye tracking potrebbe aprire nuove opportunità per personalizzare le terapie, offrendo trattamenti più precisi e adattati ai bisogni specifici di ogni bambino.

1.3 Ambliopia e strabismo

1.3.1 Definizione e manifestazioni cliniche

L'ambliopia rappresenta una delle più comuni cause di deficit visivo nei bambini, con implicazioni significative per lo sviluppo visivo, cognitivo e sociale dell'individuo. Definita come una riduzione unilaterale o bilaterale dell'acuità visiva causata da una deprivazione del pattern visivo o da un'interazione binoculare anomala[2], l'ambliopia si distingue per l'assenza di cause organiche rilevabili attraverso l'esame fisico dell'occhio. Questa condizione, che in alcuni casi può essere reversibile mediante interventi terapeutici appropriati, è essenzialmente un disturbo dello sviluppo del sistema visivo che si manifesta tipicamente durante l'infanzia.[10] La complessità dell'ambliopia si riflette nelle sue molteplici manifestazioni cliniche. Sebbene colpisca principalmente un solo occhio, è importante notare che anche l'occhio considerato "non ambliope" può presentare sottili deficit funzionali. Le conseguenze dell'ambliopia vanno oltre la semplice riduzione dell'acuità visiva, influenzando una vasta gamma di funzioni visive monoculari, tra cui l'acuità reticolare, l'acuità di Vernier e la sensibilità al contrasto.[11] Inoltre, gli occhi ambliopi possono manifestare anomalie dell'accomodazione e deficit oculomotori, che possono compromettere ulteriormente la funzionalità visiva complessiva del paziente.[12]

1.3.2 Cause e fattori di rischio

Le cause predisponenti dell'ambliopia sono diverse e complesse. Lo strabismo, che causa un'interruzione dello sviluppo della visione binoculare, è una delle cause più frequenti. Gli errori refrattivi, in particolare l'anisometropia e l'ipermetropia significativa, rappresentano un'altra importante categoria di fattori predisponenti. Meno comunemente, l'opacizzazione dei mezzi diottrici, come nel caso della cataratta congenita, può portare allo sviluppo dell'ambliopia.[1] La comprensione di queste cause è fondamentale per l'identificazione precoce e il trattamento efficace della condizione. La prevalenza dell'ambliopia è stata oggetto di numerosi studi epidemiologici, con risultati che variano in base alla popolazione esaminata e ai criteri diagnostici utilizzati. Recenti ricerche condotte su popolazioni adulte hanno riportato una prevalenza di ambliopia unilaterale intorno al 3%, quando definita come un'acuità visiva di 6/9 o peggiore.[13] Questi dati sottolineano l'importanza di considerare l'ambliopia non solo come un problema pediatrico, ma come una condizione che persiste nell'età adulta se non adeguatamente trattata. Particolarmente illuminanti sono i risultati degli studi condotti su popolazioni pediatriche. Lo studio longitudinale ALSPAC nel Regno Unito ha fornito dati preziosi sull'efficacia degli interventi precoci. La ricerca ha dimostrato che la prevalenza di ambliopia a 7,5 anni era significativamente inferiore (1,1%) nei bambini che avevano ricevuto uno screening prescolare rispetto a quelli che non l'avevano ricevuto (2,0%). Questi risultati evidenziano l'importanza degli interventi di screening e trattamento precoce nel ridurre l'incidenza e la gravità dell'ambliopia.[14] La comprensione dei fattori di rischio per l'ambliopia è essenziale per lo sviluppo di strategie di prevenzione efficaci. La prematurità, il basso peso alla nascita e il ritardo nello sviluppo neurologico sono stati identificati come importanti fattori di rischio.[15] La storia familiare di ambliopia gioca anch'essa un ruolo significativo, suggerendo una possibile componente genetica nella suscettibilità alla condizione. La deprivazione visiva precoce, come quella causata da cataratta congenita o ptosi, può portare a forme particolarmente gravi di ambliopia se non trattata tempestivamente. Lo strabismo infantile e gli errori refrattivi significativi non corretti rappresentano ulteriori fattori di rischio cruciali, sottolineando l'importanza di un monitoraggio attento dello sviluppo visivo nei primi anni di vita.[16] La storia naturale dell'ambliopia è stata oggetto di dibattito nella comunità scientifica. Tuttavia, le evidenze più recenti indicano chiaramente che l'ambliopia non tende a migliorare spontaneamente senza intervento.[17] Gli studi che hanno confrontato popolazioni sottoposte a intervento precoce con quelle non trattate hanno costantemente dimostrato una minore prevalenza di ambliopia nei gruppi trattati.[18] Questi risultati sottolineano l'importanza dell'intervento terapeutico per massimizzare il potenziale di acuità visiva nell'occhio affetto.

1.3.3 Impatto sulle abilità visuomotorie e psicologiche

Le disabilità associate all'ambliopia sono molteplici e possono avere un impatto significativo sulla qualità della vita dell'individuo. Un aspetto particolarmente preoccupante è il rischio di perdita visiva nell'occhio non ambliope, stimato intorno all'1,2% nel corso della vita.[19] Questo rischio sottolinea l'importanza di massimizzare la funzione visiva in entrambi gli

occhi attraverso il trattamento dell'ambliopia. Inoltre, l'ambliopia può influenzare le scelte di carriera, limitando l'accesso a professioni che richiedono una visione binoculare ottimale o standard visivi elevati. Le difficoltà in attività quotidiane, come la guida notturna, sono state riportate da adulti con ambliopia, evidenziando l'impatto a lungo termine della condizione.[20] L'impatto dell'ambliopia sulle abilità visuomotorie è un'area di crescente interesse nella ricerca. La ridotta stereopsia, una caratteristica comune dell'ambliopia, può influenzare significativamente le capacità di manipolazione fine e la coordinazione mano-occhio. Studi hanno dimostrato che la visione binoculare offre vantaggi in situazioni che richiedono certezza spaziale e facilita il controllo della manipolazione, del raggiungimento e dell'equilibrio. Le persone con ambliopia possono sperimentare difficoltà in compiti che richiedono una percezione tridimensionale accurata. Tuttavia, la ricerca in questo campo è ancora limitata, soprattutto per quanto riguarda l'impatto sulle abilità motorie fini e grossolane nei bambini in età scolare.[21] Le implicazioni psicosociali dell'ambliopia sono significative e spesso sottovalutate. L'impatto sull'autostima e sullo sviluppo psicologico del bambino può essere considerevole, soprattutto nei casi di strabismo evidente.[22] Le difficoltà nelle relazioni interpersonali e nell'ottenere un impiego sono state riportate in studi su adulti con ambliopia, evidenziando le conseguenze a lungo termine della condizione. Lo stress e l'ansia associati alla condizione e al suo trattamento possono influenzare non solo il paziente ma anche l'intera dinamica familiare.[23]

1.3.4 Trattamento

Il trattamento dell'ambliopia è un processo complesso che richiede un approccio multifaccettato. La correzione della condizione predisponente è il primo passo fondamentale, che può avvenire con l'intervento chirurgico per correggere lo strabismo o rimuovere le opacità dei mezzi diottrici, o la correzione dell'errore refrattivo attraverso occhiali o lenti a contatto. La fase successiva del trattamento tipicamente coinvolge l'occlusione o la penalizzazione dell'occhio dominante per stimolare lo sviluppo visivo dell'occhio ambliope.[1] Recenti studi randomizzati e controllati hanno fornito preziose informazioni sull'efficacia di diverse modalità di trattamento. È emerso che due ore di occlusione giornaliera possono essere efficaci quanto sei ore per l'ambliopia moderata, un risultato che ha importanti implicazioni per la gestione clinica e la compliance al trattamento. L'uso dell'atropina come alternativa all'occlusione si è dimostrato efficace, con la somministrazione nel fine settimana che offre risultati paragonabili alla somministrazione giornaliera per l'ambliopia moderata. Questi risultati offrono maggiore flessibilità nella scelta del trattamento, permettendo di adattarlo alle esigenze individuali del paziente e della famiglia.[3] Un'importante scoperta recente riguarda l'efficacia della sola correzione dell'errore refrattivo nel migliorare l'acuità visiva in alcuni casi di ambliopia. Questo "periodo di adattamento refrattivo" può portare a significativi miglioramenti dell'acuità visiva prima dell'inizio di qualsiasi terapia occlusiva, suggerendo che in alcuni casi l'occlusione potrebbe non essere necessaria o potrebbe essere ritardata. La questione del trattamento attivo o passivo durante l'occlusione rimane oggetto di studio. Alcuni dati preliminari suggeriscono che le attività da vicino durante l'occlu-

sione possono migliorare i risultati del trattamento, ma sono necessari ulteriori studi per confermare questi risultati e determinare le attività più efficaci.[24]

1.3.5 Effetti del trattamento

I risultati del trattamento dell'ambliopia possono essere significativi, con molti pazienti che sperimentano notevoli miglioramenti dell'acuità visiva. Tuttavia, è importante notare che circa un quarto dei bambini trattati con successo può sperimentare una riduzione dell'acuità visiva entro il primo anno dalla fine del trattamento.[25] Questo sottolinea l'importanza di un follow-up a lungo termine, raccomandato per almeno 12 mesi dopo il completamento dell'occlusione o della penalizzazione.[26] L'impatto emotivo del trattamento dell'ambliopia sul bambino e sulla famiglia è un aspetto fondamentale da considerare nella gestione clinica. Molti genitori riportano stress o un aumento dei conflitti in casa durante il trattamento, e i bambini sottoposti a occlusione spesso mostrano resistenza.[4] La compliance al trattamento è influenzata da una serie di fattori, tra cui l'età del paziente, la privazione sociale, il livello di acuità visiva e la comprensione dei genitori della condizione e del trattamento.[27][28] Valide strategie per migliorare la compliance, come l'educazione dei genitori e il supporto psicologico, sono fondamentali per ottimizzare i risultati del trattamento.

1.3.6 Implicazioni economiche

Dal punto di vista economico, il trattamento dell'ambliopia è considerato altamente cost-effective. I benefici a lungo termine, intesi come miglioramento della qualità della vita e del potenziale guadagno economico per l'individuo trattato, superano significativamente i costi del trattamento.[29] Questo aspetto è particolarmente rilevante nella pianificazione delle politiche sanitarie e nell'allocazione delle risorse per i programmi di screening e trattamento precoce.

1.4 Tecnologie utilizzate

Il presente elaborato si propone di esaminare l'architettura tecnologica alla base di un sistema innovativo per l'interazione uomo-macchina, concentrandosi sull'integrazione di diverse librerie e framework avanzati, impiegati nel campo della visione artificiale e dell'interazione gestuale. L'obiettivo primario è lo sviluppo di un sistema capace di interpretare in modo preciso i movimenti umani, in particolare quelli oculari, per tradurli in comandi ed azioni concrete all'interno di un'interfaccia grafica, con applicazioni specifiche nel contesto della riabilitazione visiva per bambini affetti da ambliopia e strabismo. Le tecnologie principali utilizzate sono Python, OpenCV, MediaPipe, Pygame e PyAutoGUI, ciascuna delle quali contribuisce in maniera significativa all'efficacia complessiva del sistema.

1.4.1 Python

Python è stato scelto come linguaggio di programmazione principale per via della sua flessibilità e della sua vasta libreria di strumenti dedicati alla computer vision e all'elaborazione del segnale. Python, con la sua sintassi semplice e la facilità d'uso, è ideale per prototipare rapidamente e integrare componenti eterogenei come quelli richiesti da questo progetto. In particolare, l'ecosistema di librerie disponibili per Python consente una perfetta interazione tra moduli di computer vision e interfacce grafiche, agevolando lo sviluppo di applicazioni che richiedono prestazioni in tempo reale. Inoltre, grazie alla natura multiplatforma del linguaggio, il sistema può essere eseguito su diversi ambienti operativi (Windows, macOS, Linux), garantendo un'elevata portabilità e rendendo la soluzione accessibile a una vasta gamma di dispositivi.[30]

1.4.2 OpenCV

Una delle librerie cardine di questo progetto è OpenCV (Open Source Computer Vision Library), uno strumento ampiamente utilizzato nel campo della computer vision per il trattamento e l'elaborazione delle immagini. OpenCV offre una vasta gamma di algoritmi e tecniche per l'elaborazione di immagini statiche e flussi video in tempo reale, rendendolo indispensabile per applicazioni come il tracciamento oculare. In questo progetto, OpenCV è utilizzato per catturare i flussi video direttamente dalla webcam e per pre-elaborare queste immagini, eseguendo operazioni come la riduzione del rumore, la segmentazione e il rilevamento di contorni. Questo processo di elaborazione è essenziale per individuare i tratti specifici del volto e degli occhi dell'utente, in modo che possano essere tracciati con precisione. OpenCV garantisce che le operazioni di elaborazione delle immagini siano eseguite in modo rapido ed efficiente, migliorando la fluidità dell'interazione.[31]

1.4.3 MediaPipe

Il componente chiave per il tracciamento preciso degli occhi è MediaPipe, una piattaforma sviluppata da Google, progettata per fornire soluzioni avanzate di tracciamento in tempo reale. MediaPipe si distingue per la sua capacità di rilevare e tracciare i punti di riferimento del volto, comprese le posizioni degli occhi e le loro caratteristiche, permettendo una rilevazione accurata dei movimenti oculari. A differenza di altre librerie che richiedono lo sviluppo di algoritmi complessi, MediaPipe offre modelli pre-addestrati che facilitano l'implementazione di funzionalità avanzate come l'eye tracking senza la necessità di formare modelli da zero. Grazie alla sua architettura ottimizzata, MediaPipe è in grado di operare con latenza minima, garantendo che i movimenti oculari dell'utente siano tradotti in comandi con rapidità e precisione, rendendo l'interazione uomo-macchina fluida e naturale. Questa tecnologia è essenziale per il funzionamento dei giochi interattivi sviluppati, in cui i movimenti oculari del giocatore vengono utilizzati come metodo di controllo primario.[7]

1.4.4 Pygame

Per gestire la parte grafica del progetto è stato utilizzato Pygame, un modulo del linguaggio Python che fornisce un ambiente per lo sviluppo di giochi 2D. Pygame è ideale per creare interfacce grafiche interattive, poiché consente di gestire facilmente finestre grafiche, eventi e input dell'utente. Nell'ambito di questo progetto, Pygame è utilizzato per visualizzare il feedback in tempo reale dei movimenti oculari dell'utente e per gestire la logica dei giochi progettati. La capacità di Pygame di gestire gli input esterni e di rispondere rapidamente agli eventi consente di offrire un'esperienza utente altamente reattiva. Inoltre, grazie alla sua semplicità e flessibilità, Pygame permette di implementare rapidamente nuovi prototipi di giochi e di testare diverse dinamiche di gioco, facilitando l'adattamento del sistema alle esigenze terapeutiche specifiche.[32]

1.4.5 PyAutoGUI

Infine, PyAutoGUI rappresenta uno strumento essenziale per l'interfacciamento del sistema con il sistema operativo. PyAutoGUI è una libreria che consente di simulare input di tastiera e mouse, permettendo di automatizzare azioni come il clic del mouse o la pressione dei tasti in risposta ai movimenti oculari tracciati. Questa libreria risulta particolarmente utile per tradurre i movimenti oculari dell'utente in comandi concreti, rendendo possibile il controllo di applicazioni o sistemi operativi senza la necessità di input fisici tradizionali. La natura multiplatforma di PyAutoGUI consente al sistema di essere compatibile con diversi ambienti operativi, ampliando il suo potenziale di utilizzo su vari dispositivi.[33]

1.5 Struttura della tesi

- **Introduzione:** Questo capitolo introduce il tema della tesi, definendo gli obiettivi della ricerca e contestualizzando il problema dell'ambliopia e dello strabismo. Viene fornita una panoramica delle tecnologie utilizzate e una breve descrizione della struttura della tesi;
- **Stato dell'arte:** Il secondo capitolo esamina la letteratura esistente e le tecnologie rilevanti. Si analizza l'evoluzione dell'eye tracking e le sue applicazioni, con una rassegna su MediaPipe e le tecniche di computer vision per la riabilitazione visiva. Si approfondisce il concetto di gamification e si discutono i giochi utilizzati per la riabilitazione visiva esistenti;
- **Proposta:** Questo capitolo descrive il sistema proposto, includendo l'architettura dei giochi sviluppati e l'implementazione dell'eye tracking utilizzando MediaPipe. Viene presentata anche una descrizione degli algoritmi di computer vision utilizzati per il progetto;

- **Conclusione:** Nell'ultimo capitolo si sintetizzano i risultati ottenuti e si discute il contributo della ricerca. Viene fornita una conclusione finale basata sui risultati e sulle osservazioni emerse durante lo sviluppo della tesi.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Storia e sviluppo del tracciamento oculare

2.1.1 Origini

La storia del tracciamento oculare inizia alla fine del XIX secolo, quando Louis Émile Javal, un oftalmologo francese, fu tra i primi a osservare che la lettura non è un processo fluido, ma è caratterizzata da movimenti oculari a scatti, noti come saccadi, alternati a brevi pause, chiamate fissazioni.[34][35] Queste scoperte furono fondamentali per lo studio del comportamento visivo, aprendo la strada a successive indagini sull'occhio umano.

Nel 1908, Edmund Huey, uno psicologo americano, costruì uno dei primi strumenti per il tracciamento oculare, basato su un sistema meccanico che monitorava i movimenti oculari durante la lettura. Huey riuscì a costruire un dispositivo che collegava una lente a contatto a una leva meccanica in grado di registrare su carta i movimenti oculari, permettendo una prima rappresentazione grafica di tali movimenti.[36] Questo fu un passo rivoluzionario per l'epoca, nonostante la natura intrusiva del dispositivo.

Negli anni successivi, altri pionieri come Guy Thomas Buswell e Alfred L. Yarbus migliorarono queste tecniche. Buswell fu tra i primi a utilizzare le fotografie per studiare il comportamento visivo di soggetti che guardavano immagini complesse, dimostrando che i movimenti oculari non erano casuali, ma rispondevano a schemi di attenzione mirati.[37][38] Yarbus, uno psicologo russo, fu celebre per il suo libro del 1967 "Eye Movements and Vision", dove dimostrò che i movimenti oculari potevano rivelare molto sui processi cognitivi e sugli obiettivi di un osservatore. Yarbus condusse esperimenti in cui i soggetti osservavano scene visive complesse, e attraverso il tracciamento oculare fu in grado di determinare che il percorso visivo dipendeva dai compiti assegnati.[39]

2.1.2 Innovazioni tecnologiche

Con il progredire della tecnologia, i dispositivi di tracciamento oculare divennero meno invasivi e più precisi. Negli anni '50, grazie all'introduzione di strumenti basati su fotocellule, fu possibile registrare in modo automatico e più accurato i movimenti oculari. Un significativo progresso si ebbe nel 1958, quando J. F. Mackworth e N. H. Mackworth svilupparono

un sistema televisivo per tracciare i movimenti oculari su scene dinamiche, applicando per la prima volta il tracciamento oculare in un contesto di realtà mutevole.[40]

Negli anni '70, l'interesse per l'eye tracking si ampliò, soprattutto grazie agli studi di David Noton e Lawrence Stark, che introdussero il concetto di scanpath. Essi dimostrarono che il comportamento visivo si articolava in sequenze ben definite di saccadi e fissazioni, connesse al processo percettivo dell'osservatore.[41] Questo concetto divenne una base importante per lo studio della percezione visiva e aprì la strada a nuove applicazioni nell'ambito della psicologia cognitiva e delle neuroscienze.[42]

Negli anni '90, grazie all'avvento delle tecnologie digitali e dei computer, il tracciamento oculare divenne sempre più preciso e accessibile. I primi sistemi basati su videocamere a infrarossi furono introdotti per misurare in modo non invasivo la posizione della pupilla e il riflesso corneale, consentendo una maggiore libertà di movimento ai soggetti studiati.[43] Questo progresso fu essenziale per espandere le applicazioni del tracciamento oculare al di fuori dei laboratori scientifici e accademici, rendendolo uno strumento fondamentale anche in ambito commerciale e industriale.[44]

2.2 Tecnologia e metodi

2.2.1 Metodi di rilevazione

La tecnologia alla base dei moderni dispositivi di tracciamento oculare si basa sulla tecnica del Pupil Center Corneal Reflection (PCCR).[45] Questo metodo utilizza una sorgente di luce infrarossa, invisibile all'occhio umano, che illumina l'occhio. La luce si riflette sulla cornea e la pupilla, e queste riflessioni vengono catturate da una telecamera ad alta risoluzione. Le immagini vengono quindi elaborate da un software che calcola la direzione dello sguardo attraverso la triangolazione tra il riflesso corneale e la posizione della pupilla.[46]

I sistemi PCCR sono molto precisi e utilizzati nella maggior parte dei dispositivi di eye tracking, sia in quelli remoti, montati su schermi o superfici, sia nei sistemi mobili, come gli occhiali eye tracker.[47] Questi ultimi permettono al soggetto di muoversi liberamente, rendendoli particolarmente utili per studi in ambienti naturali o non controllati, come lo shopping o l'interazione quotidiana con oggetti fisici.[48]

2.2.2 Metriche

Le principali informazioni ottenibili attraverso il tracciamento oculare riguardano i punti di fissazione e le saccadi. Una fissazione avviene quando l'occhio si ferma su un punto specifico per un periodo di tempo sufficiente a consentire l'elaborazione visiva dello stimolo. Le saccadi, al contrario, sono i rapidi movimenti dell'occhio che si verificano tra una fissazione e l'altra, permettendo di spostare lo sguardo da un punto all'altro.[49]

Altre metriche rilevanti sono:

- Tempo di fissazione: misura la durata di ciascuna fissazione su un determinato stimolo. Un tempo di fissazione più lungo può indicare un maggiore interesse o una maggiore difficoltà nel processare l'informazione;[50]
- Sequenza di fissazione: permette di ricostruire l'ordine con cui gli occhi hanno osservato diverse aree di uno stimolo. Questa metrica è utilizzata per studiare quali elementi attirano per primi l'attenzione e come cambia l'attenzione visiva nel tempo;[41]
- Heatmap: una rappresentazione visiva che utilizza colori per indicare le aree di maggiore o minore attenzione visiva. Le aree più osservate sono rappresentate con colori caldi (come il rosso), mentre le aree meno osservate sono evidenziate con colori freddi (blu o verde).[51]

Queste metriche sono fondamentali per numerosi campi di applicazione, come il marketing, la progettazione di interfacce digitali, la psicologia e la medicina.[52]

2.3 Applicazioni

2.3.1 Ricerca scientifica e psicologica

Il tracciamento oculare è ampiamente utilizzato nella ricerca scientifica, in particolare nel campo della psicologia cognitiva e delle neuroscienze. Attraverso l'analisi dei movimenti oculari, i ricercatori possono ottenere informazioni preziose su come il cervello umano elabora gli stimoli visivi e su come questi processi si collegano all'attenzione, alla memoria e all'apprendimento.[53]

Un'applicazione significativa riguarda lo studio della lettura e della comprensione del testo. Gli studiosi analizzano come gli individui muovono gli occhi durante la lettura di un testo, identificando le aree di difficoltà, i punti in cui si verificano riletture e la velocità di lettura.[54] Questo ha permesso di sviluppare modelli di lettura che variano in base all'età, al livello di alfabetizzazione e alle abilità linguistiche.[55]

Nel campo delle neuroscienze, il tracciamento oculare è utilizzato per studiare le basi neurali della percezione visiva e del controllo motorio degli occhi. Ad esempio, l'analisi dei movimenti oculari durante l'osservazione di volti può fornire informazioni su come il cervello processa le espressioni facciali e le emozioni.[56]

In psicologia, l'eye tracking è usato per studiare l'attenzione visiva in popolazioni affette da disturbi cognitivi o psicologici. Ad esempio, in pazienti con disturbo dello spettro autistico (ASD), i ricercatori hanno osservato modelli di attenzione visiva alterati, con una minore tendenza a fissare lo sguardo su volti e occhi delle persone.[57] Questi studi hanno portato a importanti progressi nella diagnosi e nella comprensione dei disturbi dello sviluppo.[58]

2.3.2 Marketing e ricerca di mercato

Il tracciamento oculare ha rivoluzionato il campo del marketing e della ricerca di mercato, permettendo di analizzare il comportamento visivo dei consumatori durante l'interazione

con i prodotti, le pubblicità e gli ambienti di vendita.[59] L'eye tracking consente di raccogliere dati su dove i consumatori guardano per primi, quanto tempo trascorrono osservando un prodotto e come si muovono visivamente all'interno di un negozio o di una pagina web.[60]

Ad esempio, molti brand leader utilizzano l'eye tracking per testare i loro spot pubblicitari, verificando se i messaggi chiave vengono notati dai consumatori e quali elementi visivi catturano maggiormente l'attenzione.[61] Inoltre, nel packaging design, l'eye tracking aiuta a determinare quali confezioni risaltano maggiormente sugli scaffali dei negozi, ottimizzando così la disposizione e la visibilità dei prodotti.[62]

L'uso di occhiali con eye tracker consente di raccogliere dati anche in ambienti di vendita reali, fornendo informazioni su come i clienti si spostano all'interno del negozio, quali prodotti guardano per primi e quali ignorano.[63] Questa tecnologia è stata particolarmente utile per migliorare l'esperienza del cliente nei negozi fisici e per ottimizzare il layout dei punti vendita.[64]

2.3.3 Interazione uomo-macchina

Nel campo dell'interazione uomo-macchina, il tracciamento oculare ha trovato ampie applicazioni nella progettazione di interfacce più intuitive e user-friendly. Analizzando come gli utenti interagiscono con le interfacce digitali, i ricercatori possono ottimizzare la disposizione degli elementi visivi, migliorando la navigazione e riducendo il tempo necessario per trovare informazioni.[65]

Un'applicazione tipica riguarda i test di usabilità dei siti web. Gli sviluppatori di siti web utilizzano il tracciamento oculare per determinare se gli utenti trovano facilmente le informazioni desiderate e per migliorare la visibilità dei call to action (CTA), come pulsanti o link che incoraggiano all'azione. Se un sito risulta difficile da navigare o gli elementi chiave non vengono notati, l'eye tracking permette di identificare le aree problematiche e di migliorare l'architettura delle informazioni.[66]

Il tracciamento oculare ha anche trovato applicazioni nella progettazione di applicazioni mobili, dove è utilizzato per analizzare come gli utenti interagiscono con piccoli schermi e quali elementi visivi attirano maggiormente la loro attenzione. Questo ha portato a miglioramenti significativi nell'usabilità delle applicazioni, rendendo l'esperienza utente più fluida e intuitiva.[67]

2.3.4 Medicina e oftalmologia

Nel campo medico, il tracciamento oculare è utilizzato per diagnosticare e monitorare una varietà di disturbi visivi e neurologici. In oftalmologia, è impiegato per studiare patologie come il glaucoma[68], la degenerazione maculare senile (AMD)[69], e lo strabismo[70]. Il tracciamento oculare fornisce dati oggettivi sui movimenti oculari, permettendo ai medici di rilevare eventuali anomalie e diagnosticare precocemente malattie che possono compromettere la vista.[71]

Inoltre, il tracciamento oculare è utilizzato in combinazione con altre tecnologie, come la risonanza magnetica funzionale (fMRI) e l'elettroencefalografia (EEG), per studiare il

funzionamento del cervello e diagnosticare disturbi neurologici come il morbo di Parkinson, la schizofrenia e l'autismo.[72] Ad esempio, nei pazienti affetti da Alzheimer, il tracciamento oculare ha rivelato cambiamenti nei modelli di fissazione e saccade, suggerendo una ridotta capacità di elaborare informazioni visive complesse.[73]

2.3.5 Gaming e realtà virtuale

Nell'industria del gaming e della realtà virtuale (VR), il tracciamento oculare è stato utilizzato per migliorare l'esperienza di gioco e rendere l'interazione con il gioco più immersiva e personalizzata. Grazie all'eye tracking, i giochi possono adattarsi in tempo reale ai movimenti oculari del giocatore, rendendo possibile, ad esempio, il controllo degli avatar o il cambiamento delle ambientazioni semplicemente guardando determinati punti dello schermo.[74]

L'eye tracking nella realtà virtuale ha applicazioni molto promettenti: permette di ridurre la latenza nelle interazioni e di rendere l'esperienza più coinvolgente, poiché il sistema può rispondere immediatamente ai cambiamenti nello sguardo dell'utente. In futuro, si prevede che il tracciamento oculare possa diventare una parte integrante della progettazione di giochi, rendendo l'interazione uomo-macchina ancora più naturale e fluida.[75]

2.3.6 Fattori umani e simulazione

Il tracciamento oculare ha trovato applicazioni anche nell'ambito dei fattori umani e della simulazione, in particolare nel settore automobilistico. Gli oculografi vengono utilizzati per monitorare l'attenzione visiva dei conducenti, rilevando i segnali di affaticamento o distrazione.[76] Grazie a questi strumenti, è possibile migliorare la sicurezza alla guida, avvisando il conducente quando mostra segni di sonnolenza o perdita di concentrazione.[77]

I simulatori di guida, dotati di sistemi di tracciamento oculare, vengono utilizzati per addestrare i conducenti e per testare nuovi sistemi di assistenza alla guida. In questi contesti, l'eye tracking permette di analizzare come i conducenti distribuiscono l'attenzione tra la strada, il cruscotto e gli specchietti, fornendo informazioni utili per migliorare il design dei veicoli e dei sistemi di assistenza alla guida.[78]

2.4 Tecniche di computer vision per la terapia visiva

La computer vision è un settore dell'intelligenza artificiale che consente ai computer di interpretare e comprendere immagini e video, replicando, in parte, le capacità visive umane. Grazie alla sua capacità di analizzare rapidamente ed efficacemente dati visivi complessi, la computer vision gioca un ruolo fondamentale sia nella diagnosi precoce di disturbi visivi, come l'ambliopia e lo strabismo, sia nella progettazione di programmi di trattamento personalizzati e adattabili, che monitorano continuamente i progressi del paziente. Le tecniche di computer vision permettono di identificare con precisione le anomalie oculari, misurare e correggere i difetti oculomotori, monitorare i movimenti oculari e creare stimoli visivi specificamente progettati per riattivare le connessioni visive nel cervello. Inoltre, con

l'ausilio della realtà virtuale (VR) e della realtà aumentata (AR), la terapia può essere resa più interattiva e motivante, migliorando significativamente l'aderenza al trattamento e, di conseguenza, i risultati finali.[79]

2.4.1 Diagnosi

La diagnosi precoce di disturbi visivi, quali l'ambliopia e lo strabismo, ha compiuto notevoli progressi grazie all'impiego della computer vision. Attraverso l'uso di algoritmi sofisticati e immagini ad alta risoluzione, è ora possibile identificare con maggiore accuratezza e tempestività le anomalie oculari, spesso prima che emergano attraverso i metodi clinici tradizionali.

Tradizionalmente, la diagnosi dei disturbi visivi richiede esami manuali e soggettivi eseguiti da specialisti. Questi possono includere test visivi standard, esami della retina e valutazioni della funzione binoculare. Tuttavia, queste valutazioni, pur essendo efficaci, dipendono in gran parte dall'interpretazione dell'operatore e dalla cooperazione del paziente, il che può introdurre variabili e incertezze nel processo diagnostico. Inoltre, i test manuali possono essere imprecisi, soprattutto nei bambini piccoli o in pazienti con difficoltà cognitive.[80][81]

Gli algoritmi di computer vision offrono una diagnosi oggettiva e automatizzata, migliorando notevolmente l'accuratezza. Questi algoritmi analizzano immagini e video degli occhi del paziente e rilevano in modo rapido e preciso qualsiasi anomalia. Un esempio comune è l'uso di tecniche di elaborazione delle immagini per rilevare la presenza di ambliopia nei bambini piccoli: invece di affidarsi a test visivi che richiedono la cooperazione del bambino, la computer vision può rilevare microdisallineamenti o lievi differenze nei movimenti oculari, permettendo una diagnosi precoce e più accurata.[82]

Uno degli strumenti più potenti nella diagnosi oftalmologica basata su computer vision è il sistema di eye tracking, che misura e registra con precisione i movimenti oculari di un paziente in tempo reale. Utilizzando videocamere ad alta velocità e algoritmi di tracciamento, il sistema cattura il comportamento degli occhi, monitorando ogni piccolo spostamento. Questo è particolarmente utile per identificare problemi come lo strabismo o altre disfunzioni della motilità oculare che possono passare inosservati durante un esame manuale.[83]

Nel caso dell'ambliopia, i sistemi di eye tracking possono rilevare differenze minime nei movimenti dei due occhi, identificando tempestivamente l'occhio pigro. Questi dati sono poi utilizzati per creare esercizi visivi mirati, personalizzati per il paziente. Il monitoraggio continuo dei movimenti oculari durante la terapia consente di regolare gli esercizi in tempo reale, assicurando un trattamento più efficiente e adattato alle esigenze del paziente.[84]

2.4.2 Sistemi e tecniche di eye tracking

I sistemi di eye tracking utilizzano una combinazione di telecamere ad alta velocità, sensori infrarossi e algoritmi di computer vision per monitorare dove una persona sta guardando, la velocità dei suoi movimenti oculari e come questi movimenti cambiano nel tempo.[5] Nei

contesti terapeutici, l'eye tracking rappresenta uno strumento fondamentale per la diagnosi e il trattamento di disturbi visivi.[53]

L'idea di base alla base dell'eye tracking è semplice: quando guardiamo qualcosa, i nostri occhi eseguono una serie di movimenti complessi che riflettono la nostra attenzione visiva e la nostra capacità di elaborare l'informazione visiva. Tuttavia, in condizioni come l'ambliopia o lo strabismo, questi movimenti possono risultare alterati o non sincronizzati tra i due occhi. Un sistema di eye tracking può quindi rilevare questi disallineamenti e anomalie nei movimenti oculari, fornendo dati preziosi per il monitoraggio e la personalizzazione della terapia visiva.[85]

Gli avanzamenti tecnologici nella computer vision hanno reso possibile lo sviluppo di sistemi di eye tracking estremamente precisi, che possono essere utilizzati sia in ambienti clinici che a casa per la terapia visiva. Esistono due principali categorie di tecniche di eye tracking utilizzate nella terapia visiva:

- **Tracciamento del riflesso corneale:** Questa tecnica utilizza una luce a infrarossi per illuminare l'occhio del paziente, creando un riflesso sulla cornea. Il sistema di computer vision rileva il riflesso e la posizione della pupilla, monitorando i movimenti dell'occhio rispetto al riflesso della luce.[86] Questa tecnica è particolarmente utile per i pazienti con strabismo, poiché consente di identificare e misurare accuratamente il disallineamento degli occhi e la direzione dello sguardo.[83]
- **Tracciamento video o basato su immagini:** Questa tecnica si basa su videocamere ad alta risoluzione che catturano immagini dettagliate degli occhi del paziente in movimento. Gli algoritmi di computer vision analizzano quindi i video per rilevare piccole variazioni nei movimenti oculari, come lo sfarfallio dell'occhio pigro nei pazienti con ambliopia. Questi dati possono essere utilizzati per determinare la gravità della condizione e per monitorare i progressi del paziente nel tempo.[87]

2.4.3 Benefici nell'identificazione delle anomalie del movimento oculare

Uno dei principali vantaggi dell'eye tracking nella terapia visiva è la sua capacità di rilevare anomalie nei movimenti oculari che potrebbero non essere facilmente identificabili attraverso esami clinici tradizionali.[81] Nel caso dello strabismo, l'eye tracking può misurare con precisione l'angolo di disallineamento tra i due occhi, informazioni cruciali per decidere il tipo di trattamento, che si tratti di esercizi visivi o chirurgia correttiva.[80]

Inoltre, nel contesto dell'ambliopia, il tracciamento oculare consente di rilevare se l'occhio pigro sta "scansando" correttamente l'ambiente visivo o se presenta movimenti anomali, come il nistagmo (movimenti involontari rapidi degli occhi). Queste informazioni sono fondamentali per personalizzare i programmi di riabilitazione, poiché aiutano il terapeuta a comprendere meglio come l'occhio pigro sta rispondendo agli stimoli visivi.[88]

2.4.4 Dispositivi e software

Sul mercato esistono diverse soluzioni pratiche basate su eye tracking per la terapia visiva, che combinano hardware avanzato e software intelligente. Alcuni di questi sistemi sono progettati per l'uso clinico, mentre altri sono orientati verso l'uso domestico, consentendo ai pazienti di continuare la terapia in modo autonomo.

- Occhiali di eye tracking: Sono occhiali dotati di sensori a infrarossi e telecamere che monitorano i movimenti oculari in tempo reale. Questi dispositivi possono essere indossati durante la terapia, consentendo al paziente di svolgere compiti quotidiani mentre il sistema registra i movimenti oculari. Questa flessibilità è particolarmente utile per la riabilitazione a lungo termine.[89]
- Software di training visivo: Esistono numerosi software che integrano l'eye tracking in esercizi e giochi terapeutici. Questi programmi sono progettati per essere utilizzati su computer o tablet, rendendo accessibile la terapia a casa. Il software registra i movimenti oculari e adatta automaticamente la difficoltà degli esercizi in base ai progressi del paziente.[90]
- Dispositivi standalone: Alcuni dispositivi portatili, come quelli basati su realtà virtuale, combinano l'eye tracking con esercizi visivi interattivi. Questi dispositivi offrono un approccio immersivo alla terapia, che risulta particolarmente utile per coinvolgere i pazienti pediatrici.[91]

2.4.5 Realtà virtuale e realtà aumentata

L'integrazione della realtà virtuale e della realtà aumentata nella terapia visiva rappresenta un avanzamento significativo nell'approccio terapeutico per condizioni come l'ambliopia e lo strabismo. Entrambe queste tecnologie offrono un ambiente immersivo in cui i pazienti possono svolgere esercizi visivi in modo coinvolgente e interattivo, superando le barriere delle terapie tradizionali.

La realtà virtuale immerge il paziente in un ambiente completamente simulato, in cui è possibile manipolare gli stimoli visivi e monitorare i movimenti oculari in tempo reale. Grazie alla computer vision e ai sistemi di eye tracking integrati, la VR consente di creare esercizi specifici che stimolano l'occhio pigro o correggono il disallineamento degli occhi. Inoltre, l'immersione totale nella VR può essere utilizzata per forzare entrambi gli occhi a lavorare insieme, migliorando la coordinazione binoculare.[92]

D'altra parte, la realtà aumentata sovrappone immagini virtuali al mondo reale, permettendo ai pazienti di svolgere esercizi visivi nella loro routine quotidiana. Questo approccio è meno invasivo rispetto alla VR e può essere utilizzato in ambienti più pratici, come a scuola o a casa. Con la realtà aumentata, i pazienti possono vedere immagini o oggetti aggiunti alla loro vista normale, che richiedono la cooperazione di entrambi gli occhi per essere interpretati correttamente.[93]

2.4.6 Tecniche di computer vision integrate in ambienti VR

Le tecniche di computer vision svolgono un ruolo cruciale nell'integrazione della VR/AR con la terapia visiva. Nei sistemi VR, gli algoritmi di visione artificiale analizzano continuamente i movimenti oculari del paziente, regolando l'ambiente virtuale per fornire il giusto livello di stimolazione visiva. Ad esempio, nella terapia per l'ambliopia, la VR può rendere l'immagine vista dall'occhio dominante meno definita, costringendo l'occhio pigro a partecipare più attivamente alla visione.[94]

Gli algoritmi di fusione binoculare rappresentano un altro esempio di come la computer vision possa supportare la terapia visiva in VR. Questi algoritmi regolano l'intensità degli stimoli visivi in ciascun occhio, adattando dinamicamente il livello di complessità delle attività visive in base ai progressi del paziente. Questo approccio personalizzato massimizza l'efficacia della terapia, garantendo che ogni sessione contribuisca a un miglioramento progressivo della cooperazione tra i due occhi.[95]

Un esempio notevole di applicazione della VR nella terapia visiva è Vivid Vision, un sistema sviluppato appositamente per trattare l'ambliopia e lo strabismo. Utilizzando un visore VR e algoritmi di computer vision, Vivid Vision crea scenari virtuali che costringono entrambi gli occhi a lavorare insieme. Il software è in grado di monitorare i movimenti oculari in tempo reale e adattare la difficoltà degli esercizi a seconda dei progressi del paziente. In alcuni studi clinici, l'uso di questo tipo di terapia si è dimostrato più efficace delle terapie tradizionali basate sull'occlusione.[96]

2.4.7 Algoritmi per la stimolazione visiva personalizzata

Uno degli usi più promettenti della computer vision nella terapia visiva è la creazione di stimoli visivi personalizzati per ogni paziente. La terapia visiva tradizionale spesso si basa su esercizi generici che non tengono conto delle peculiarità del singolo paziente. Al contrario, la computer vision permette di sviluppare soluzioni altamente adattive, capaci di rispondere in tempo reale alle necessità di ciascun paziente, migliorando così l'efficacia del trattamento.[97]

L'approccio della personalizzazione degli stimoli visivi si basa sull'acquisizione continua di dati attraverso sistemi di eye tracking o videocamere.[95] Grazie alla computer vision, i movimenti oculari del paziente vengono monitorati in tempo reale e utilizzati per adattare gli esercizi visivi. Un esempio di applicazione è rappresentato dalla terapia binoculare, in cui i due occhi vengono stimolati in maniera differente per favorire l'uso dell'occhio pigro nel caso dell'ambliopia.[98] Se il sistema rileva che l'occhio dominante continua a predominare, l'algoritmo può immediatamente modificare l'intensità dello stimolo, regolando la luminosità o il contrasto, fino a quando l'occhio pigro inizia a partecipare attivamente.[99]

Questo approccio è utile anche per i pazienti con strabismo, dove l'allineamento oculare è cruciale. Gli algoritmi possono generare stimoli visivi che richiedono la cooperazione tra entrambi gli occhi, monitorando la risposta di ciascun occhio e regolando l'esercizio per migliorare la fusione binoculare. Ad esempio, il paziente può essere chiamato a seguire un oggetto in movimento sullo schermo;[100] se il sistema rileva un disallineamento degli occhi,

può modificare la velocità o il movimento dell'oggetto per favorire la cooperazione tra i due occhi.[101]

Una delle sfide principali nella riabilitazione dell'ambliopia è fornire stimoli sufficientemente complessi e variati per stimolare l'occhio pigro senza affaticarlo. Grazie ai pattern visivi generati automaticamente da algoritmi di computer vision, è possibile modulare il livello di complessità in base ai progressi del paziente.[97]

Un classico esempio di stimolo visivo sono i pattern Gabor, ovvero griglie di linee inclinate o curve che possono essere utilizzate per attivare diverse aree della corteccia visiva. Gli algoritmi di computer vision creano questi pattern e li regolano dinamicamente durante la terapia, variando l'orientamento, il contrasto e la frequenza spaziale a seconda della risposta dell'occhio pigro. Questo approccio permette di stimolare specifiche aree della retina e migliora il recupero della funzione visiva.[102]

Nel caso di terapie in realtà virtuale, questi pattern visivi possono essere integrati all'interno di scenari di gioco o ambienti virtuali, creando un'esperienza più immersiva e interattiva per il paziente. L'algoritmo modifica automaticamente il contesto visivo per sfidare il paziente in modo graduale, migliorando la sua capacità di integrare l'input visivo da entrambi gli occhi.[103]

2.4.8 Algoritmi adattivi

Gli algoritmi adattivi permettono di creare programmi terapeutici flessibili e personalizzati, che si evolvono costantemente in base ai progressi del paziente.[97] Questo tipo di adattamento è particolarmente utile per i bambini, che possono avere difficoltà a mantenere la concentrazione su esercizi ripetitivi.[104] Algoritmi di machine learning e computer vision lavorano insieme per analizzare la risposta del paziente agli stimoli visivi e regolare dinamicamente gli esercizi proposti.

Ad esempio, nel caso di un paziente con ambliopia, l'algoritmo potrebbe monitorare quanto efficacemente il paziente riesce a seguire un oggetto in movimento con l'occhio pigro. Se il sistema rileva una riduzione della performance, potrebbe adattare la velocità o la dimensione dell'oggetto per rendere l'esercizio più facile e progressivamente aumentare la difficoltà man mano che il paziente migliora. In questo modo, la terapia diventa personalizzata non solo in base alla diagnosi iniziale, ma anche in base ai cambiamenti nel comportamento visivo del paziente nel corso del tempo.[105]

Nel caso dello strabismo, gli algoritmi di computer vision possono monitorare i movimenti di convergenza e divergenza degli occhi, regolando l'intensità degli esercizi di fusione binoculare. Se i due occhi mostrano difficoltà nel mantenere un allineamento stabile, l'algoritmo può modificare gli esercizi per ridurre il livello di sfida, permettendo ai muscoli oculari di adattarsi progressivamente fino a raggiungere una fusione stabile.[106][97]

2.4.9 Progressi nella personalizzazione delle terapie

L'integrazione della computer vision con l'intelligenza artificiale (AI) ha permesso progressi significativi nella personalizzazione delle terapie visive, aumentando la precisione con cui

i trattamenti possono essere adattati alle esigenze specifiche di ogni paziente. Oggi, grazie a tecniche di deep learning e all'uso di reti neurali artificiali, le piattaforme di riabilitazione visiva possono apprendere in maniera automatica dalle risposte del paziente, migliorando continuamente il piano terapeutico.[107]

Uno dei vantaggi principali di questi sistemi è la loro capacità di prevedere l'efficacia del trattamento. Gli algoritmi possono analizzare grandi quantità di dati raccolti durante le sessioni di terapia e utilizzarli per fare previsioni su come il paziente potrebbe rispondere a specifici stimoli o esercizi. Questo permette ai terapeuti di pianificare il trattamento in modo più strategico, focalizzando gli esercizi su aree che hanno il massimo potenziale di miglioramento.[108]

Questi sistemi personalizzati offrono anche il vantaggio di ridurre la durata complessiva della terapia. Tradizionalmente, i pazienti con ambliopia o strabismo potevano aver bisogno di anni di trattamento. Con l'uso di tecnologie avanzate come la computer vision e l'AI, la terapia può essere ottimizzata per accelerare il recupero, garantendo che ogni sessione sia il più efficace possibile.[109]

2.5 MediaPipe

MediaPipe è una piattaforma avanzata sviluppata da Google Research che rappresenta una delle tecnologie più innovative nell'ambito della computer vision e del machine learning applicati in tempo reale. Questa piattaforma fornisce strumenti all'avanguardia per semplificare l'implementazione di funzionalità di visione artificiale, rendendo più accessibile la creazione di applicazioni complesse anche per sviluppatori non specializzati. Una delle sue caratteristiche più significative è il sistema di tracciamento facciale e oculare, che utilizza un modello di rete neurale end-to-end per inferire una rappresentazione tridimensionale accurata della geometria facciale partendo da immagini monocolori acquisite con una semplice fotocamera RGB. Questo approccio non richiede l'uso di sensori di profondità, rendendo MediaPipe particolarmente versatile e accessibile per una vasta gamma di dispositivi, inclusi smartphone e tablet.

2.5.1 Tracciamento e prestazioni

Il sistema di tracciamento facciale di MediaPipe genera una mesh tridimensionale composta da 468 punti di riferimento, o "landmarks", distribuiti su tutta la superficie del volto. Questa mesh è sufficientemente densa da permettere una rappresentazione dettagliata della geometria facciale, superando di gran lunga i modelli tradizionali basati su landmark 2D, che risultano spesso limitati in termini di precisione e flessibilità.[110] La possibilità di disporre di una rappresentazione tridimensionale del volto è cruciale per una serie di applicazioni avanzate, come la realtà aumentata (AR), il tracciamento facciale in tempo reale e l'interazione uomo-macchina basata su espressioni facciali e movimenti oculari.

Il processo di tracciamento inizia con l'individuazione del volto all'interno dell'immagine di input, che viene elaborata da un rilevatore di volti in grado di generare rapidamente un

rettangolo di delimitazione (bounding box) attorno al volto e di identificare alcuni punti di riferimento chiave, tra cui i centri degli occhi, i traghetti delle orecchie e la punta del naso.[111] Questi punti servono per normalizzare l'orientamento del volto, consentendo al sistema di allineare la linea che collega i centri degli occhi con l'asse orizzontale del bounding box. Questa normalizzazione è fondamentale per garantire che il successivo processo di tracciamento sia robusto rispetto a variazioni di posa e angolazione del volto.

Una delle caratteristiche più innovative di MediaPipe è la sua capacità di predire non solo le coordinate bidimensionali (x, y) dei punti di riferimento, ma anche le coordinate di profondità (z). Questa capacità consente al sistema di ricostruire una mesh facciale tridimensionale, offrendo una rappresentazione visiva estremamente accurata e realistica. Sebbene le coordinate di profondità siano prevalentemente derivate da supervisione sintetica, ovvero dall'uso di dati sintetici generati artificialmente per l'addestramento del modello, MediaPipe riesce a produrre risultati visivamente plausibili anche in assenza di una precisione metrica assoluta nella stima della profondità. Questa capacità è particolarmente utile in applicazioni come la prova virtuale di accessori o la sovrapposizione di effetti visivi complessi che richiedono un'accurata rappresentazione tridimensionale del volto.

In particolare, MediaPipe eccelle nel tracciamento oculare, un elemento chiave per molte applicazioni che richiedono un'interazione precisa basata sul movimento degli occhi. La mesh facciale generata include punti dettagliati attorno alla regione perioculare, delineando accuratamente i contorni degli occhi, le palpebre e la direzione dello sguardo. Questa granularità consente al sistema di catturare movimenti sottili come l'ammiccamento, lo spostamento dello sguardo e le espressioni facciali che coinvolgono la zona degli occhi. La capacità di tracciare questi dettagli è fondamentale per applicazioni come il controllo oculare nei giochi o nelle interfacce utente, nonché nella creazione di avatar digitali realistici.

Un ulteriore punto di forza di MediaPipe è la sua efficienza computazionale. La piattaforma è stata ottimizzata per funzionare su dispositivi mobili, garantendo prestazioni di alto livello anche su hardware con risorse limitate. Grazie all'integrazione con TensorFlow Lite GPU, MediaPipe è in grado di eseguire inferenze in tempo reale su GPU mobile, con velocità che variano da 100 a oltre 1000 fotogrammi per secondo (FPS), a seconda del dispositivo e della configurazione del modello. Questa efficienza permette di utilizzare MediaPipe in una vasta gamma di applicazioni mobile AR, senza sacrificare la qualità delle predizioni o la responsività dell'interazione in tempo reale.[7]

2.5.2 Stabilità e accuratezza

Per garantire una maggiore stabilità nel tracciamento dei punti facciali e oculari nel tempo, MediaPipe implementa un filtro temporale unidimensionale ispirato al filtro "1 Euro", comunemente utilizzato nel campo dell'interazione uomo-macchina. Questo filtro è progettato per ridurre il jitter, ovvero il tremolio indesiderato nei video in tempo reale, bilanciando la riduzione del rumore con l'eliminazione del ritardo di fase. Grazie a questo approccio, le predizioni della mesh facciale risultano fluide e visivamente gradevoli, anche durante movimenti rapidi del volto o degli occhi.[112]

L'accuratezza delle predizioni di MediaPipe viene valutata utilizzando una metrica chiamata "mean absolute distance" (MAD), normalizzata rispetto alla distanza interoculare (IOD). Questo metodo di valutazione consente di misurare l'accuratezza del tracciamento senza che la scala del volto influenzi i risultati, garantendo una maggiore coerenza nei confronti delle variazioni dimensionali tra soggetti diversi. Gli studi condotti con annotazioni manuali hanno dimostrato che l'errore medio di MediaPipe si attesta intorno al 2,56%, un valore comparabile con la variabilità osservata tra diversi annotatori umani, il che testimonia l'affidabilità e la precisione del sistema.[7]

2.6 Gamification

2.6.1 Meccaniche e componenti

La gamification rappresenta un approccio innovativo nell'applicazione di meccaniche di gioco a contesti non ludici, con l'obiettivo di incentivare l'engagement e di motivare determinati comportamenti.[113] L'idea alla base di questa strategia risiede nel potenziale motivazionale intrinseco dei giochi, che sono in grado di trasformare attività solitamente percepite come ripetitive o poco stimolanti in esperienze coinvolgenti e piacevoli. Tra i contesti nei quali la gamification ha trovato una crescente applicazione spiccano i settori della salute, della produttività e della sostenibilità ambientale, ma è nell'ambito educativo e terapeutico che questa metodologia ha mostrato un impatto particolarmente significativo. In questi campi, la gamification si è rivelata capace di migliorare il coinvolgimento degli utenti e di incrementare la loro motivazione a portare a termine attività e trattamenti che, altrimenti, risulterebbero difficili da seguire nel lungo termine.[114]

Uno dei principali fattori che rende la gamification così efficace è l'integrazione di percorsi di progresso, che suddividono un'attività complessa in obiettivi chiari e crescenti in difficoltà. Questa suddivisione permette di rendere il processo di apprendimento o il percorso terapeutico più gestibile e meno scoraggiante per gli utenti, specialmente per i bambini. L'introduzione di feedback immediati e di premi, come badge, punti o riconoscimenti virtuali, costituisce un altro elemento centrale della gamification. Questi feedback agiscono come segnali di successo, rafforzando positivamente il comportamento e mantenendo alta la motivazione dell'utente. Un altro aspetto chiave è la componente sociale, che può essere sfruttata per incentivare la cooperazione o la competizione positiva tra gli utenti, promuovendo al contempo un senso di appartenenza a una comunità di pari. Infine, un'attenzione particolare viene riservata all'interfaccia utente, che deve essere non solo funzionale ma anche divertente e accattivante, al fine di garantire un'esperienza piacevole e motivante per l'utente.[115]

2.6.2 Impatto sulla salute

Nell'ambito della salute, la gamification ha dimostrato di avere un impatto positivo sia dal punto di vista fisico che mentale, specialmente tra i giovani. Questo approccio è stato adottato con successo per promuovere comportamenti salutari, come l'attività fisica e una corretta

alimentazione, rendendo queste pratiche più accessibili e divertenti attraverso l'integrazione di meccaniche ludiche. Grazie a questa trasformazione, l'adesione a programmi di salute e benessere tende ad aumentare, migliorando complessivamente la qualità della vita e il benessere generale degli individui. Nell'ambito della salute mentale, la gamification è stata impiegata con risultati promettenti in applicazioni che integrano tecniche di mindfulness e di resilienza emotiva, con l'obiettivo di aiutare i bambini a gestire lo stress e le emozioni in modo più efficace. Questi strumenti digitali, che utilizzano giochi per insegnare abilità socio-emotive, sono in grado di supportare lo sviluppo di competenze fondamentali per la crescita psicologica dei bambini, contribuendo a migliorare il loro equilibrio emotivo e il loro benessere mentale.[116]

2.6.3 Applicazioni nella terapia visiva

Uno degli ambiti terapeutici in cui la gamification ha trovato un'applicazione particolarmente efficace è la terapia visiva per bambini affetti da ambliopia e strabismo. Queste condizioni oculari richiedono trattamenti intensivi e prolungati che, sebbene essenziali per il miglioramento della visione, possono risultare estremamente noiosi per i bambini, aumentando il rischio di abbandono precoce del trattamento. L'introduzione di meccaniche di gioco in questo contesto permette di trasformare gli esercizi terapeutici in sfide stimolanti e divertenti, aumentando notevolmente la motivazione dei bambini a seguire il trattamento con costanza. Attraverso l'uso di giochi strutturati in progressioni di difficoltà e con ricompense immediate, i bambini sono incentivati a completare gli esercizi richiesti, trasformando un'attività potenzialmente monotona in un'esperienza gratificante. Ciò non solo migliora l'aderenza al trattamento, ma contribuisce anche al raggiungimento degli obiettivi terapeutici in modo più efficiente e sostenibile.[6]

Nel caso dell'ambliopia, in particolare, la personalizzazione del trattamento tramite la gamification svolge un ruolo molto importante. I giochi terapeutici possono essere progettati per adattarsi alle capacità visive del singolo bambino, offrendo sfide progressivamente più complesse e fornendo feedback in tempo reale sui progressi raggiunti. Questo approccio non solo favorisce una maggiore partecipazione attiva del paziente, ma permette anche un monitoraggio continuo dei miglioramenti visivi. Il superamento di livelli di difficoltà e il raggiungimento di obiettivi specifici non solo rafforzano le abilità visive del bambino, ma creano anche un senso di realizzazione personale, che motiva ulteriormente il paziente a proseguire il trattamento.

2.6.4 Considerazioni etiche e sicurezza

Tuttavia, per garantire che la gamification mantenga i suoi effetti benefici nel tempo, è essenziale che gli interventi siano progettati con cura e attenzione. In primo luogo, le attività proposte devono essere adeguate all'età del bambino e calibrate in base alle sue capacità cognitive ed emotive. L'utilizzo di meccaniche di gioco deve essere eticamente responsabile, evitando di creare dipendenza da ricompense esterne o di sovraccaricare l'utente con stimoli eccessivi, che potrebbero compromettere l'efficacia del trattamento. Inoltre, in contesti

terapeutici che coinvolgono bambini, è fondamentale garantire la sicurezza e la privacy dei dati raccolti durante il trattamento. I giochi terapeutici spesso richiedono la raccolta di dati sensibili, come le informazioni relative ai progressi visivi e alle prestazioni durante gli esercizi, e la protezione di questi dati deve essere una priorità assoluta per evitare violazioni della privacy e garantire un ambiente sicuro e protetto per i giovani pazienti.[8]

2.7 Giochi per la riabilitazione visiva

2.7.1 Vivid Vision

Vivid Vision, precedentemente noto come Diplopia, rappresenta un'applicazione all'avanguardia della realtà virtuale nel campo dell'oftalmologia. Questo sistema sfrutta la tecnologia VR per creare un ambiente immersivo in cui il paziente interagisce con oggetti virtuali, mentre il software manipola sottilmente le immagini presentate a ciascun occhio.

Il principio fondamentale di Vivid Vision risiede nella sua capacità di presentare stimoli visivi differenziati ai due occhi. L'occhio ambliope riceve immagini più luminose e ad alto contrasto, mentre l'occhio dominante viene esposto a stimoli più tenui. Questa disparità controllata mira a bilanciare l'input visivo, incoraggiando il cervello a integrare le informazioni provenienti da entrambi gli occhi.

La versatilità di Vivid Vision si manifesta attraverso una serie di minigiochi che spaziano dal colpire asteroidi alla guida di navicelle spaziali. Questi scenari non solo mantengono alto l'interesse del paziente, ma permettono anche di individuare e correggere specifici aspetti della funzione visiva, come la percezione della profondità e la coordinazione mano-occhio.

L'efficacia di questo approccio è stata avvalorata da uno studio che ha evidenziato miglioramenti significativi sia nell'acuità visiva che nella stereopsi in pazienti adulti con ambliopia dopo un periodo di trattamento di otto settimane. Questi risultati suggeriscono che la plasticità del sistema visivo può essere stimolata anche in età adulta, contrastando la convinzione tradizionale che l'ambliopia sia trattabile solo nell'infanzia.[103]

2.7.2 AmblyoPlay

AmblyoPlay offre una varietà di giochi pensati per essere utilizzati su diverse piattaforme, come tablet e computer. Questa versatilità lo rende particolarmente adatto per l'integrazione nella routine quotidiana dei pazienti, facilitando l'aderenza al trattamento.

Il sistema impiega due tecniche principali: l'occlusione intermittente e la stimolazione dicottica. L'occlusione intermittente rappresenta un'evoluzione digitale del tradizionale metodo di bendaggio, alternando rapidamente la presentazione di elementi chiave del gioco tra i due occhi. Questo approccio mira a stimolare l'occhio ambliope senza causare il disagio associato all'occlusione prolungata.

La stimolazione dicottica, d'altra parte, consiste nella presentazione simultanea di immagini diverse ai due occhi, incoraggiando il cervello a fondere le informazioni per ottenere una percezione coerente. Questa tecnica si basa sul principio della rivalità binoculare, sfruttandola per rafforzare le connessioni neurali dell'occhio ambliope.[105]

Un aspetto particolarmente innovativo di AmblyoPlay è il suo sistema di adattamento automatico della difficoltà. Analizzando le prestazioni del paziente in tempo reale, il software modula la complessità dei compiti visivi, mantenendo un equilibrio ottimale tra sfida e fattibilità. Questo approccio personalizzato massimizza l'efficacia del trattamento, evitando sia la frustrazione dovuta a compiti troppo difficili sia la noia derivante da esercizi troppo semplici.[117]

Lo studio condotto da Herbison nel 2016 ha fornito evidenze empiriche dell'efficacia di AmblyoPlay, dimostrando miglioramenti significativi nell'acuità visiva di bambini che hanno integrato il sistema nel loro regime di trattamento. Questi risultati sottolineano il potenziale della gamification nel migliorare l'aderenza e l'efficacia dei trattamenti oftalmologici pediatrici.[105]

2.7.3 Dig Rush

Dig Rush rappresenta un interessante esempio di come un concetto di gioco apparentemente semplice possa essere ingegnosamente adattato per scopi terapeutici. Sviluppato per iPad, questo gioco sfrutta la tecnica della stimolazione dicottica in un contesto narrativo coinvolgente.

Il gioco ruota attorno al concetto di un minatore che deve raccogliere oro e portarlo in superficie. L'innovazione risiede nella presentazione differenziata degli elementi di gioco ai due occhi: l'occhio ambliope visualizza gli elementi critici (come il personaggio del minatore e l'oro) ad alto contrasto, mentre l'occhio dominante percepisce gli elementi di sfondo a basso contrasto.

Questa disparità di contrasto è fondamentale per il meccanismo terapeutico di Dig Rush. Inizialmente, la differenza di contrasto tra le immagini presentate ai due occhi è marcata, favorendo fortemente l'input dell'occhio ambliope. Man mano che il paziente progredisce, questa differenza viene gradualmente ridotta, sfidando il cervello a integrare sempre più efficacemente le informazioni provenienti da entrambi gli occhi.

La progressione della difficoltà in Dig Rush non si limita solo al contrasto, ma include anche la complessità degli scenari di gioco e la velocità delle azioni richieste. Questo approccio multidimensionale alla difficoltà assicura che il trattamento rimanga stimolante e adattato alle capacità in evoluzione del paziente.

L'efficacia di Dig Rush è stata validata da uno studio che ha dimostrato miglioramenti significativi dell'acuità visiva in bambini con ambliopia. Questi risultati sono particolarmente incoraggianti considerando la natura non invasiva e ludica del trattamento, che lo rende particolarmente adatto per l'uso pediatrico.[104][118]

2.7.4 EyeSwift

EyeSwift si distingue nel panorama dei trattamenti digitali per la sua focalizzazione specifica sullo strabismo e per l'utilizzo innovativo della tecnologia di eye tracking. Questo sistema rappresenta un punto di incontro tra la precisione della diagnostica strumentale e l'approccio ludico alla riabilitazione.

EyeSwift utilizza un sofisticato sistema di eye tracking che monitora con estrema precisione i movimenti oculari del paziente durante l'esecuzione di vari esercizi visivi presentati sotto forma di giochi. Questa capacità di tracciamento in tempo reale permette una valutazione continua e oggettiva delle prestazioni del paziente, superando i limiti dei metodi di valutazione tradizionali che spesso dipendono dall'osservazione soggettiva.

Gli esercizi proposti da EyeSwift coprono un ampio spettro di funzioni oculomotorie, includendo esercizi per migliorare la convergenza, la divergenza e i movimenti di inseguimento. Questa varietà permette di targettizzare specifici aspetti della disfunzione oculomotoria associata allo strabismo.

Un aspetto particolarmente innovativo di EyeSwift è la sua capacità di adattare dinamicamente gli esercizi in base alle prestazioni del paziente. Questa personalizzazione in tempo reale assicura che il trattamento rimanga costantemente calibrato sulle capacità e sui progressi individuali del paziente, massimizzando l'efficacia terapeutica.

EyeSwift ha dimostrato miglioramenti significativi nella funzione binoculare di pazienti con strabismo, suggerendo che l'approccio basato sull'eye tracking può offrire un valido complemento o, in alcuni casi, un'alternativa ai metodi di trattamento tradizionali dello strabismo.[119]

2.7.5 Tetris dicottico

La versione dicottica di Tetris rappresenta un brillante esempio di come un gioco classico e universalmente riconosciuto possa essere adattato per scopi terapeutici. Questo adattamento sfrutta la familiarità e l'appeal intrinseco di Tetris per creare un'esperienza di trattamento coinvolgente e efficace.

Il principio fondamentale di questa versione modificata di Tetris risiede nella presentazione differenziata degli elementi di gioco ai due occhi. L'occhio ambliope visualizza i blocchi in caduta, elementi dinamici e critici per il gameplay, mentre l'occhio dominante percepisce i blocchi già impilati sul fondo, che rappresentano informazioni di contesto più statiche.

Questa divisione degli elementi visivi tra i due occhi crea una situazione in cui il paziente deve necessariamente integrare le informazioni provenienti da entrambi gli occhi per giocare efficacemente. Tale integrazione forzata stimola attivamente i meccanismi neurali responsabili della fusione binoculare, promuovendo il rafforzamento delle connessioni sinaptiche associate.

La progressione della difficoltà in Tetris dicottico è multidimensionale. Oltre all'aumento della velocità di caduta dei blocchi, tipico del Tetris tradizionale, questa versione terapeutica modula anche il contrasto tra gli elementi presentati ai due occhi. Inizialmente, la disparità di contrasto è marcata, favorendo l'input dell'occhio ambliope. Con il progredire del trattamento, questa differenza viene gradualmente ridotta, sfidando il sistema visivo a integrare informazioni sempre più bilanciate tra i due occhi.

L'efficacia di questo approccio è stata dimostrata in modo convincente da uno studio che ha evidenziato miglioramenti significativi nella visione binoculare di adulti con ambliopia

dopo soli due settimane di utilizzo del gioco. Questi risultati sono particolarmente rilevanti in quanto sfidano la concezione tradizionale secondo cui l'ambliopia sia trattabile solo nell'infanzia, aprendo nuove prospettive per il trattamento in età adulta.[120]

La semplicità concettuale di Tetris, combinata con la sua natura coinvolgente, lo rende un candidato ideale per trattamenti a lungo termine, dove l'aderenza del paziente è cruciale. Inoltre, la possibilità di implementare questo gioco su diverse piattaforme, dai computer agli smartphone, ne aumenta l'accessibilità e la facilità di integrazione nella routine quotidiana dei pazienti.[121]

Capitolo 3

Proposta

3.1 Descrizione del sistema proposto

Nel contesto della cura di disturbi visivi come l'ambliopia e lo strabismo, il trattamento precoce risulta fondamentale per ottenere miglioramenti duraturi, soprattutto nei bambini, in quanto la plasticità cerebrale offre un'opportunità unica per correggere le alterazioni visive. L'adozione di nuove tecnologie e approcci innovativi ha aperto la strada a metodi di trattamento più coinvolgenti e stimolanti, particolarmente indicati per i pazienti pediatrici.[1]

Il sistema proposto in questa tesi prevede l'utilizzo di due giochi progettati appositamente per il trattamento di ambliopia e strabismo nei bambini. L'idea di base è di sfruttare l'interazione videoludica come uno strumento terapeutico, mirato a potenziare la capacità visiva attraverso esercizi specifici, senza che i bambini percepiscano l'attività come una terapia tradizionale. Questo aspetto è cruciale, poiché i bambini tendono ad annoiarsi o a sentirsi frustrati quando sottoposti a trattamenti ripetitivi. Grazie alla gamification, ossia l'uso di elementi di gioco in contesti non ludici, come quello terapeutico, è possibile mantenere alta la motivazione e l'impegno dei bambini, facilitando il loro coinvolgimento attivo nel percorso di trattamento. In questo modo, l'approccio terapeutico non solo diventa più accessibile e divertente, ma mantiene anche la sua efficacia clinica, trasformando un'attività clinica ripetitiva in un'esperienza coinvolgente.[8]

La scelta di utilizzare due giochi distinti nasce dall'esigenza di affrontare separatamente gli aspetti fondamentali di questi due disturbi visivi. Da un lato, il primo gioco è stato concepito per trattare il problema della visione binoculare, concentrandosi su esercizi che stimolano l'uso coordinato di entrambi gli occhi. Questo gioco prevede meccaniche basate sul movimento e l'inseguimento di oggetti su schermo che si spostano a diverse velocità e direzioni. L'obiettivo è indurre il cervello a integrare correttamente le immagini ricevute da entrambi gli occhi, migliorando così la visione stereoscopica e la percezione della profondità.[96][104]

Il secondo gioco, invece, è stato sviluppato specificamente per rafforzare l'occhio affetto da ambliopia, migliorandone le capacità visive attraverso esercizi mirati. In questo caso, il bambino viene coinvolto in una serie di attività che richiedono l'utilizzo predominante dell'occhio più debole, forzando il cervello a impiegare maggiormente la visione di quel-

l'occhio per completare i compiti. Le meccaniche di gioco sono state progettate per essere gratificanti e non ripetitive. Questo mantiene elevato il coinvolgimento del bambino nel gioco, riducendo al minimo il rischio di noia e abbandono del trattamento.[105]

Il sistema si distingue per la sua attenzione al dettaglio nell'adattare i giochi alle esigenze specifiche dei pazienti. Ogni sessione di gioco è pensata per durare un tempo sufficiente a garantire un effetto terapeutico, senza però risultare troppo lunga da indurre noia o affaticamento visivo.[114]

Un altro aspetto innovativo del sistema proposto è la sua capacità di rendere il trattamento accessibile anche a casa. Tradizionalmente, le terapie per ambliopia e strabismo richiedono la presenza costante di un ortottista o di un oculista, limitando la frequenza delle sessioni terapeutiche. Tuttavia, grazie alla natura ludica dei giochi e alla semplicità d'uso del sistema, i bambini possono proseguire il trattamento anche in un ambiente domestico, sotto la supervisione dei genitori. Questo approccio ha il vantaggio di aumentare la continuità della terapia, riducendo i tempi morti tra una sessione e l'altra, e migliorando così i risultati a lungo termine.[115]

La progettazione del sistema ha tenuto in considerazione anche i principi di inclusività e accessibilità, per garantire che il trattamento possa essere utilizzato da bambini di diverse età e abilità. I giochi sono stati sviluppati con un'interfaccia intuitiva e facilmente comprensibile, adatta sia a bambini molto piccoli che a quelli più grandi, indipendentemente dal loro livello di abilità tecnologica. Questo aspetto è fondamentale, poiché l'usabilità del sistema determina direttamente la capacità del bambino di interagire con i giochi in modo efficace e senza frustrazione. Inoltre, l'interfaccia è stata progettata per essere visivamente attraente e semplice da navigare, riducendo al minimo le distrazioni e garantendo che il focus rimanga sugli esercizi terapeutici.

Dal punto di vista dell'accessibilità, il sistema non richiede una conoscenza approfondita della tecnologia da parte dei genitori o degli stessi bambini. L'interfaccia user-friendly e il design ergonomico assicurano che il sistema possa essere utilizzato senza difficoltà anche da chi non ha familiarità con i dispositivi tecnologici. Questo è particolarmente importante, poiché una barriera tecnologica potrebbe scoraggiare l'uso continuativo del sistema e compromettere l'efficacia della terapia. Il sistema, quindi, offre un'esperienza fluida e accessibile che permette ai bambini di concentrarsi esclusivamente sull'esperienza di gioco, senza essere ostacolati da difficoltà tecniche.

In termini di inclusività, è stata prestata particolare attenzione anche alla progettazione dei contenuti visivi. I giochi includono diversi livelli di difficoltà, che si adattano progressivamente alle capacità del bambino, evitando il rischio di frustrazione dovuta a sfide eccessivamente complesse. Questo design consente anche ai bambini con forme più gravi di ambliopia o strabismo di partecipare attivamente al trattamento, garantendo che nessuno venga escluso dal percorso terapeutico. Inoltre, il sistema incoraggia il bambino a proseguire nella terapia grazie a elementi di gioco gratificanti, come premi o avanzamenti di livello, che stimolano un senso di realizzazione e soddisfazione.[65]

3.2 Architettura dei giochi

La progettazione e lo sviluppo dei due giochi proposti, Brick Breaker e Memory, rappresentano un aspetto fondamentale nel sistema terapeutico per il trattamento di ambliopia e strabismo nei bambini. Entrambi i giochi sono stati progettati con l'obiettivo di fornire stimoli visivi mirati, mantenendo un'interfaccia semplice e accessibile, per garantire un'esperienza di gioco coinvolgente e terapeuticamente efficace. Sebbene i giochi siano destinati a scopi terapeutici, la loro architettura è concepita per mantenere un equilibrio tra la sfida ludica e l'efficacia clinica. Ciò significa che la complessità degli elementi di gioco non solo garantisce il divertimento, ma favorisce anche l'impegno e il miglioramento delle capacità visive nei bambini.

Ogni gioco è progettato in modo modulare, con un'architettura che permette l'adattabilità del sistema ai progressi del bambino. Entrambi condividono un motore di gioco centrale che gestisce le dinamiche di interazione, ma si differenziano profondamente per quanto riguarda le meccaniche e gli obiettivi specifici. Brick Breaker si concentra sul miglioramento della visione binoculare e della coordinazione oculare attraverso un gioco dinamico e stimolante, mentre Memory mira a rafforzare l'occhio affetto da ambliopia attraverso esercizi di memoria visiva e attenzione selettiva. In entrambi i casi, la struttura e l'implementazione dei giochi seguono principi di semplicità e intuitività, con una complessità che si adatta alle capacità del bambino.

3.2.1 Brick Breaker

Brick Breaker è un gioco progettato per stimolare la visione binoculare e la coordinazione oculare, sfruttando meccaniche basate sul movimento e sull'interazione dinamica tra l'utente e gli oggetti visivi. L'architettura del gioco è costruita intorno a un sistema di rilevamento visivo che assegna agli occhi specifiche funzioni, costringendo il bambino a usare entrambi gli occhi in modo coordinato per completare i livelli.

Alla base di Brick Breaker c'è un motore grafico che gestisce la creazione e l'interazione degli oggetti sullo schermo. I mattoni virtuali, disposti in diversi schemi geometrici, sono l'elemento centrale del gioco. Un livello presenta una disposizione unica dei mattoni, progettata per variare in termini di complessità e difficoltà.

Il meccanismo principale del gioco si basa sul concetto di una pallina che deve essere lanciata contro i mattoni per distruggerli. Il bambino controlla una piattaforma mobile posizionata nella parte inferiore dello schermo, utilizzata per colpire la pallina e dirigere il suo movimento verso i mattoni. La piattaforma deve essere spostata orizzontalmente, richiedendo al bambino di seguire il movimento della pallina con lo sguardo e di anticiparne la traiettoria, un esercizio che migliora la coordinazione oculare e la capacità di inseguimento visivo. Ogni volta che la pallina colpisce un mattone, il giocatore riceve punti, e quando tutti i mattoni di un livello sono distrutti, il livello viene superato e il giocatore vince la partita.

Una delle caratteristiche fondamentali di Brick Breaker è la variabilità degli oggetti e delle sfide che vengono presentate nel corso del gioco. La pallina cambia direzione, costringendo il

bambino a reagire rapidamente e a spostare lo sguardo in modo coordinato per seguire il suo movimento. Questo tipo di meccanica serve a migliorare la capacità di inseguimento degli oggetti in movimento e a potenziare la visione binoculare attraverso una pratica costante e ripetitiva.

Un altro elemento chiave nell'architettura di Brick Breaker è il design delle superfici di collisione. Per esempio, il bambino deve prestare particolare attenzione a dove posizionare la piattaforma, anticipando il punto in cui la pallina toccherà il bordo per poterla indirizzare verso i mattoni rimasti. Questa caratteristica introduce una componente strategica, che incoraggia il bambino a pensare in anticipo e a pianificare i suoi movimenti, stimolando la coordinazione tra cervello e occhi.

In termini di grafica, Brick Breaker utilizza uno stile visivo semplice ma accattivante, con colori vivaci che catturano l'attenzione del bambino e mantengono alto il livello di concentrazione. La scelta dei colori non è casuale: i mattoni e gli oggetti in movimento sono colorati in modo tale da essere facilmente distinguibili anche per i bambini con problemi di visione, evitando l'uso di colori simili o sfumature che potrebbero confondere l'occhio affetto da ambliopia. Inoltre, il contrasto tra lo sfondo del gioco e gli oggetti mobili è stato attentamente progettato per garantire una chiara separazione visiva, migliorando così la capacità del bambino di concentrarsi sugli elementi più importanti.

L'architettura di Brick Breaker è modulare, permettendo aggiornamenti e modifiche nel tempo. Nuovi livelli possono essere aggiunti, così come nuove varianti di mattoni e bonus, mantenendo il gioco interessante anche dopo numerose sessioni di utilizzo. L'obiettivo finale del gioco non è solo completare i livelli, ma migliorare la capacità visiva del bambino in modo graduale e continuativo. Ogni sessione di gioco rappresenta una sfida visiva che contribuisce a rafforzare la visione binoculare, stimolando il cervello a coordinare gli occhi in modo più efficace.

3.2.2 Memory

Memory, il secondo gioco proposto, si concentra sul rafforzamento dell'occhio affetto da ambliopia, utilizzando meccaniche basate sulla memoria visiva e sull'attenzione selettiva. Questo gioco è progettato per stimolare l'utilizzo predominante dell'occhio affetto, migliorando la capacità del bambino di distinguere tra oggetti visivi simili e potenziando la sua capacità di ricordare stimoli visivi nel breve termine.

L'architettura di Memory si basa su un meccanismo di gioco semplice ma altamente efficace: il bambino viene presentato con una griglia di carte coperte, ciascuna delle quali nasconde un'immagine. Lo scopo del gioco è scoprire e abbinare le coppie di immagini identiche nel minor numero di tentativi possibile.

Il contrasto tra le carte e lo sfondo della griglia è stato ottimizzato per ridurre la fatica visiva e garantire che il bambino possa concentrarsi sugli elementi importanti senza sforzarsi eccessivamente.

In termini di grafica, Memory utilizza uno stile visivo accattivante e colorato, con animazioni fluide che rendono il gioco piacevole e visivamente interessante. Le animazioni

sono progettate per essere lente e fluide, in modo da non affaticare la vista del bambino e da permettergli di concentrarsi su ogni carta e immagine senza fretta.

Un altro aspetto importante del design di Memory è la sua capacità di fornire un feedback immediato al bambino. Quando il bambino trova una coppia di carte corrispondenti, queste cambiano colore diventando verdi per indicare il successo. Questo tipo di feedback positivo è fondamentale per mantenere alta la motivazione e per incoraggiare il bambino a proseguire nel gioco. Al contrario, quando il bambino commette un errore, il gioco non lo punisce in modo esplicito, ma semplicemente invita il bambino a riprovare, promuovendo un ambiente di apprendimento positivo e non giudicante.

L'architettura di Memory è progettata per essere modulare e flessibile, consentendo l'aggiunta di nuovi livelli, immagini e modalità di gioco nel tempo. Questo garantisce che il gioco possa essere aggiornato e migliorato costantemente, offrendo nuove sfide al bambino e mantenendo il gioco stimolante anche dopo numerose sessioni.

3.3 Implementazione dell'eye tracking con MediaPipe

Il sistema utilizza la libreria MediaPipe, nota per la sua versatilità ed efficienza nell'elaborazione di flussi multimodali di dati percettivi. MediaPipe fornisce soluzioni pronte all'uso per vari compiti di visione artificiale e percezione corporea, come il rilevamento facciale e il tracciamento delle mani, mentre in questo progetto viene impiegata per il tracciamento accurato dei punti di riferimento facciali con particolare attenzione alla regione oculare.

La scelta di MediaPipe per l'eye tracking è ideale grazie alla sua implementazione robusta di algoritmi di visione artificiale e modelli di deep learning, che garantiscono precisione e prestazioni in tempo reale anche su hardware di fascia media. L'architettura modulare del framework facilita l'integrazione con altre componenti software, come PyGame per la visualizzazione, permettendo flessibilità e scalabilità nel sistema. Infine, MediaPipe è progettato per operare in modo efficiente su piattaforme multiple, dai dispositivi mobili ai desktop, fino alle interfacce web, rendendolo adatto a una vasta gamma di applicazioni basate sull'eye tracking.

3.3.1 Inizializzazione e configurazione di MediaPipe

Il processo di eye tracking inizia con l'inizializzazione e la configurazione di MediaPipe. Nel codice, questo viene realizzato attraverso l'istanziamento di un oggetto FaceMesh:

```
1 with mp_face_mesh.FaceMesh(  
2     max_num_faces=1,  
3     refine_landmarks=True,  
4     min_detection_confidence=0.5,  
5     min_tracking_confidence=0.5) as face_mesh:
```

In particolare:

- `max_num_faces=1`: Questo parametro limita il rilevamento a un solo volto. Tale scelta è utile in un contesto di eye tracking per applicazioni interattive individuali, come

nel caso di un gioco. Limitare il rilevamento a un singolo volto non solo ottimizza le prestazioni riducendo il carico computazionale, ma semplifica anche la logica dell'applicazione, evitando la necessità di gestire scenari multi-utente più complessi. Tuttavia, è importante notare che questa limitazione potrebbe non essere adatta in contesti diversi, come sistemi di sorveglianza o applicazioni multi-utente;

- `refine_landmarks=True`: L'attivazione di questa opzione è cruciale per l'accuratezza dell'eye tracking. Quando impostato su True, MediaPipe utilizza un modello di raffinamento aggiuntivo che migliora significativamente la precisione dei punti di riferimento rilevati, con particolare attenzione alle regioni degli occhi e della bocca. Questo processo di raffinamento implica un leggero overhead computazionale, ma i benefici in termini di precisione sono sostanziali, specialmente per applicazioni che richiedono un tracciamento oculare di alta qualità. Il modello di raffinamento opera attraverso una rete neurale convoluzionale (CNN) specializzata che prende in input i punti di riferimento iniziali e l'immagine originale, producendo correzioni fini delle posizioni dei landmark. Questo passaggio è particolarmente importante per gestire situazioni di occlusione parziale, variazioni di illuminazione o espressioni facciali complesse;
- `min_detection_confidence=0.5`: Questo parametro stabilisce la soglia minima per considerare valido un rilevamento del volto. Un valore di 0.5 rappresenta un equilibrio tra sensibilità e specificità. Valori più bassi aumenterebbero la sensibilità del rilevamento, potenzialmente catturando più volti in condizioni difficili, ma aumenterebbero anche il rischio di falsi positivi. Valori più alti, d'altra parte, ridurrebbero i falsi positivi ma potrebbero causare mancati rilevamenti in condizioni non ottimali. La scelta di questa soglia ha implicazioni dirette sulla reattività e la stabilità del sistema di eye tracking. Un valore troppo basso potrebbe portare a rilevamenti erratici, causando instabilità nell'interfaccia utente, mentre un valore troppo alto potrebbe rendere il sistema meno responsivo in condizioni di illuminazione variabile o movimenti rapidi;
- `min_tracking_confidence=0.5`: Questo parametro definisce la soglia minima per mantenere il tracciamento dei punti di riferimento tra i fotogrammi. È particolarmente importante per la fluidità dell'eye tracking, in quanto influenza direttamente la capacità del sistema di mantenere un tracciamento coerente nel tempo. Un valore di 0.5 offre un buon compromesso tra stabilità e adattabilità. Valori più bassi permetterebbero al sistema di mantenere il tracciamento anche in condizioni più difficili, ma potrebbero portare a un tracciamento meno accurato. Valori più alti garantirebbero una maggiore precisione ma potrebbero causare interruzioni più frequenti nel tracciamento, richiedendo una nuova rilevazione completa del volto.

La configurazione di questi parametri riflette un attento bilanciamento tra accuratezza, efficienza e robustezza.

3.3.2 Elaborazione dei fotogrammi ed estrazione dei punti di riferimento

La parte fondamentale dell'implementazione dell'eye tracking è il ciclo principale di elaborazione dei fotogrammi. Questo processo trasforma il flusso video grezzo in dati utili per il tracciamento oculare.

Acquisizione e conversione del colore

```
1 succ, image = cap.read()
2 image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2RGB)
```

Questo passaggio iniziale è fondamentale per preparare l'immagine all'elaborazione con MediaPipe. La funzione `cap.read()` cattura un nuovo fotogramma dalla webcam, restituendo un flag di successo e l'immagine stessa. La conversione dallo spazio colore BGR (predefinito di OpenCV) a RGB è necessaria perché MediaPipe opera nello spazio colore RGB. Questa conversione garantisce che i colori siano interpretati correttamente nelle fasi successive di elaborazione.

Preparazione dell'immagine per MediaPipe

```
1 image.flags.writeable = False
2 res = face_mesh.process(image)
3 image.flags.writeable = True
```

L'immagine viene temporaneamente contrassegnata come non scrivibile prima dell'elaborazione con MediaPipe. Questa tecnica può migliorare le prestazioni evitando copie non necessarie dell'immagine in memoria. Dopo l'elaborazione, l'immagine viene nuovamente resa scrivibile per eventuali modifiche successive.

Elaborazione con MediaPipe

Il metodo `face_mesh.process(image)` applica una serie di reti neurali convoluzionali (CNN) ottimizzate per rilevare e tracciare i punti di riferimento facciali. Il processo tipicamente include: rilevamento del volto nell'immagine, stima della posa 3D del volto e identificazione di 468 punti di riferimento facciali, con particolare attenzione alle regioni degli occhi, del naso e della bocca.

Estrazione dei punti di riferimento

```
1 if res.multi_face_landmarks:
2     for face_landmarks in res.multi_face_landmarks:
```

Questa sezione del codice gestisce il risultato dell'elaborazione di MediaPipe. In particolare, `res.multi_face_landmarks` contiene i dati dei punti di riferimento facciali rilevati.

3.3.3 Calcolo della posizione degli occhi

Il calcolo preciso della posizione degli occhi trasforma i dati grezzi dei punti di riferimento in informazioni utili sulla posizione dello sguardo. Analizzando in dettaglio la funzione `update_eye_position`:

```

1  def update_eye_position(face_landmarks):
2      global min_x, max_x
3
4      occhio_sx_x = sum([face_landmarks.landmark[i].x for i in [362, 263, 386,
5                          374]]) / 4
6      occhio_dx_x = sum([face_landmarks.landmark[i].x for i in [33, 133, 159,
7                          145]]) / 4
8
9      avg_x = (occhio_sx_x + occhio_dx_x) / 2
10
11     min_x = min(min_x, avg_x)
12     max_x = max(max_x, avg_x)
13
14     if min_x < max_x:
15         norm_x = 1 - (avg_x - min_x) / (max_x - min_x)
16         game_x = int(norm_x * dw)
17     else:
18         game_x = int((1 - avg_x) * dw)
19
20     return game_x

```

Selezione dei punti di riferimento

I punti [362, 263, 386, 374] per l'occhio sinistro e [33, 133, 159, 145] per l'occhio destro corrispondono approssimativamente ai bordi esterni e interni di ciascun occhio. La scelta di questi punti specifici è fondamentale per diverse ragioni:

- **Robustezza:** Utilizzando più punti per ciascun occhio, il sistema è meno sensibile a piccoli errori di rilevamento su singoli punti;
- **Precisione:** I punti selezionati forniscono una buona approssimazione del centro di ciascun occhio;
- **Stabilità:** Questi punti tendono a rimanere relativamente stabili anche durante espressioni facciali o piccoli movimenti della testa.

Calcolo della posizione media degli occhi

```

1  occhio_sx_x = sum([face_landmarks.landmark[i].x for i in [362, 263, 386,
2                          374]]) / 4
3  occhio_dx_x = sum([face_landmarks.landmark[i].x for i in [33, 133, 159,
4                          145]]) / 4

```

Questo calcolo della media riduce il rumore e aumenta la stabilità del tracciamento. Utilizzando la media di quattro punti per ciascun occhio, si ottiene una stima più robusta della posizione dell'occhio rispetto all'uso di un singolo punto.

Media tra gli occhi

```
1 avg_x = (occhio_sx_x + occhio_dx_x) / 2
```

Calcolare la media tra la posizione dell'occhio sinistro e destro fornisce un singolo punto di riferimento per la posizione dello sguardo. Questo approccio ha diversi vantaggi:

- Compensa piccole asimmetrie facciali;
- Riduce l'impatto di eventuali errori di rilevamento su un singolo occhio;
- Fornisce una rappresentazione più stabile della direzione generale dello sguardo.

Normalizzazione min-max

La normalizzazione min-max è una tecnica comune per scalare i dati in un intervallo specifico, tipicamente $[0, 1]$. Questa tecnica trasforma linearmente i valori originali, preservando le relazioni tra i dati. La formula generale per la normalizzazione min-max è:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Dove:

- x è il valore originale;
- x_{min} è il valore minimo nel set di dati;
- x_{max} è il valore massimo nel set di dati;
- x_{norm} è il valore normalizzato risultante.[122]

Nel contesto del sistema di eye tracking, questa normalizzazione viene applicata dinamicamente, con x_{min} e x_{max} aggiornati continuamente basandosi sui valori osservati.

```
1 min_x = min(min_x, avg_x)
2 max_x = max(max_x, avg_x)
```

Questa tecnica di normalizzazione garantisce:

- Adattività: Aggiornando continuamente min_x e max_x , il sistema si adatta dinamicamente al range di movimento degli occhi dell'utente;
- Calibrazione implicita: Questo approccio implementa una forma di calibrazione implicita, eliminando la necessità di una fase di calibrazione esplicita all'inizio dell'utilizzo;

- Robustezza a variazioni: La normalizzazione dinamica rende il sistema robusto a variazioni nella posizione dell'utente rispetto alla telecamera e a differenze nelle caratteristiche facciali tra utenti diversi.

3.3.4 Calcolo della posizione normalizzata

```
1  if min_x < max_x:
2      norm_x = 1 - (avg_x - min_x) / (max_x - min_x)
3      game_x = int(norm_x * dw)
4  else:
5      game_x = int((1 - avg_x) * dw)
```

In questa parte del codice svolge determinate operazioni:

- Inversione del valore: L'uso di $1 - \dots$ inverte la direzione del movimento, assicurando che lo spostamento degli occhi verso destra corrisponda a un movimento verso destra nell'interfaccia del gioco;
- Scala alla dimensione dello schermo: Moltiplicando per dw (larghezza del display), il valore normalizzato viene mappato direttamente alle coordinate dello schermo;
- Gestione dei casi limite: La condizione `if min_x < max_x` gestisce il caso in cui non ci sia ancora un range significativo di movimento oculare rilevato, utilizzando una mappatura diretta in questi casi.

3.3.5 Integrazione con il loop di gioco

```
1  if game_x is not None:
2      player.update(game_x)
```

Questo frammento di codice racchiude diverse considerazioni importanti:

- Gestione dell'assenza di dati: Verificando che `game_x` non sia `None`, il sistema gestisce in modo semplice situazioni in cui il tracciamento oculare potrebbe temporaneamente fallire;
- Disaccoppiamento del tracciamento dal rendering: Aggiornando la posizione del giocatore solo quando sono disponibili nuovi dati di tracciamento, si evita di introdurre latenza o jitter non necessari nel rendering del gioco;
- Robustezza a interruzioni del tracciamento: Questo approccio permette al gioco di continuare a funzionare senza interruzioni anche in assenza temporanea di dati di tracciamento oculare, migliorando significativamente l'esperienza utente in condizioni non ideali.

3.4 Traduzione dei movimenti oculari in azioni di gioco

La traduzione dei movimenti oculari in azioni di gioco costituisce un elemento centrale nell'interazione tra l'utente e il sistema nei giochi basati su eye tracking. Nei giochi questa sfida viene affrontata attraverso soluzioni specifiche, adattate alle diverse dinamiche di ciascun gioco. Entrambi i giochi richiedono una mappatura precisa dei movimenti oculari, al fine di garantire un'esperienza di gioco fluida e intuitiva, migliorando l'efficacia del trattamento.

3.4.1 Brick breaker

Nel gioco Brick Breaker, il movimento degli occhi dell'utente controlla direttamente la posizione della piattaforma.

Mapping

Il codice implementa un mapping diretto tra la posizione orizzontale degli occhi e la posizione della piattaforma:

```
1     def update(self, x_occhio):
2         self.target_x = x_occhio - self.rect.width // 2
3         self.rect.x += (self.target_x - self.rect.x) * smooth_factor
```

La riga `self.target_x = x_occhio - self.rect.width // 2` allinea il centro della piattaforma allo sguardo dell'utente, mentre `self.rect.x += (self.target_x - self.rect.x) * smooth_factor` utilizza l'interpolazione lineare per spostare gradualmente la piattaforma verso il target, garantendo un movimento fluido. Il valore di `smooth_factor` (compreso tra 0 e 1) è fondamentale per la giocabilità: valori più bassi rendono i movimenti più fluidi, mentre valori più alti aumentano la reattività della piattaforma.

Interazione con la pallina

L'interazione tra la piattaforma controllata dall'utente e la pallina è gestita nella classe `Palla`:

```
1     def player_colpito(self):
2         colpito = pygame.sprite.spritecollide(self.p, palle, False)
3         return bool(colpito)
4
5     def update(self):
6         if self.player_colpito():
7             self.vy = -self.vy
8             offset = (self.rect.centerx - self.p.rect.centerx) / (self.p.rect.
9                 width // 2)
10            self.vx += offset
```

Questo codice implementa una fisica di rimbalzo basilare ma efficace:

- `player_colpito()`: Utilizza le funzioni di collisione di Pygame per rilevare quando la pallina colpisce la piattaforma;

- Inversione della velocità verticale: `self.vy = -self.vy` fa rimbalzare la pallina verso l'alto quando colpisce la piattaforma;
- Modifica della traiettoria: `offset = (self.rect.centerx - self.p.rect.centerx) / (self.p.rect.width // 2)` calcola dove la pallina ha colpito la piattaforma relativamente al suo centro. Questo valore viene poi aggiunto alla velocità orizzontale della pallina (`self.vx += offset`), permettendo al giocatore di influenzare la direzione della pallina basandosi su dove la colpisce con la piattaforma.

3.4.2 Memory

Nel gioco Memory, l'interazione basata sullo sguardo è implementata in maniera più articolata, richiedendo un'elaborazione complessa dei movimenti oculari per determinare le azioni di gioco.

Selezione delle carte

```

1  mouse_pos = pygame.mouse.get_pos()
2  for i in range(r):
3      for j in range(c):
4          if grid[i][j].collidepoint(mouse_pos):
5              if hovered_card != (i, j):
6                  hovered_card = (i, j)
7                  card_hover_start_time = time.time()
8              elif time.time() - card_hover_start_time >= 1:
9                  if [i, j] not in girata and [i, j] not in matched:
10                     girata.append([i, j])
11                     card_hover_start_time = None
12                     hovered_card = None
13          else:
14              if hovered_card == (i, j):
15                  card_hover_start_time = None
16                  hovered_card = None

```

In dettaglio:

- Rilevamento della posizione dello sguardo: `mouse_pos` rappresenta l'orientamento dello sguardo dell'utente. In questo contesto, il sistema utilizza la posizione del mouse come una sorta di proxy per simulare lo sguardo dell'utente. In sostanza, il movimento del cursore del mouse è associato direttamente alla direzione in cui l'utente sta guardando, emulando così il tracciamento oculare e consentendo al sistema di interpretare in modo accurato i cambiamenti nello sguardo;
- Rilevamento della carta guardata: `if grid[i][j].collidepoint(mouse_pos)` verifica se lo sguardo dell'utente (rappresentato dalla posizione del mouse) si trova all'interno dei confini di una specifica carta;
- Gestione del tempo di fissazione:

```
1         if hovered_card != (i, j):
2             hovered_card = (i, j)
3             card_hover_start_time = time.time()
4         elif time.time() - card_hover_start_time >= 1:
```

Questo blocco implementa la logica del tempo di fissazione. Se l'utente guarda una nuova carta, inizia un timer. Se continua a guardare la stessa carta per almeno un secondo, il sistema considera questa come una selezione intenzionale;

- Selezione della carta:

```
1         if [i, j] not in girata and [i, j] not in matched:
2             girata.append([i, j])
```

Se l'utente ha fissato una carta non ancora selezionata o accoppiata per un secondo, questa viene aggiunta alla lista girata delle carte selezionate;

- Reset del sistema di selezione:

```
1         card_hover_start_time = None
2         hovered_card = None
```

Dopo una selezione riuscita, il sistema resetta il timer e la carta attualmente guardata;

- Gestione dello sguardo che si sposta:

```
1         else:
2             if hovered_card == (i, j):
3                 card_hover_start_time = None
4                 hovered_card = None
```

Se lo sguardo si sposta via da una carta prima che sia trascorso un secondo, il sistema resetta il timer e la carta guardata.

Questo sistema di selezione offre diversi vantaggi:

- Intenzionalità: Richiedendo una fissazione di 1 secondo, si assicura che la selezione della carta sia intenzionale e non accidentale;
- Riduzione degli errori: Aiuta a prevenire selezioni indesiderate dovute a rapidi movimenti degli occhi o a brevi fissazioni casuali;
- Ritmo di gioco: Impone un ritmo più riflessivo al gioco, coerente con la natura del Memory, dando al giocatore il tempo di processare mentalmente la posizione di ogni carta.

Gestione del gioco

Una volta che le carte sono state selezionate, il gioco procede con la logica tipica del Memory:

```
1     if len(girata) == 2:
2         turno += 1
3         if val_grid[girata[0][0]][girata[0][1]] == val_grid[girata[1][0]][girata
4             [1][1]]:
5             matched.extend(girata)
6         else:
7             sbag.extend(girata)
            girata.clear()
```

Questo codice gestisce la logica di gioco dopo che due carte sono state selezionate:

- Incremento del contatore dei turni;
- Verifica se le carte selezionate sono uguali;
- Se sono uguali, vengono aggiunte alla lista `matched`;
- Se sono diverse, vengono temporaneamente aggiunte alla lista `sbag` delle carte sbagliate;
- La lista `girata` viene svuotata, preparando il sistema per la prossima coppia di selezioni.

Feedback visivo

Il gioco fornisce un feedback visivo chiaro sullo stato delle carte:

- Carte girate: Mostrano il loro valore in nero;
- Carte accoppiate correttamente: Mostrano il loro valore in verde, fornendo un feedback positivo immediato;
- Carte accoppiate erroneamente: Mostrano il loro valore in rosso, segnalando chiaramente l'errore.

Questo sistema di colori non solo fornisce informazioni chiare sullo stato del gioco, ma aiuta anche a guidare l'attenzione dell'utente, un aspetto particolarmente importante in un gioco controllato con gli occhi.

Capitolo 4

Conclusione

4.1 Introduzione ai sondaggi

L'ultimo capitolo della presente tesi si propone di analizzare i dati raccolti attraverso due sondaggi somministrati ai partecipanti. Il primo sondaggio, incentrato su accessibilità, usabilità e inclusività dei giochi, mirava a valutare l'efficacia dei videogiochi sviluppati per il trattamento dell'ambliopia e dello strabismo, focalizzandosi in particolare su quanto essi risultassero intuitivi e facili da usare per i bambini di età compresa tra i 3 e i 12 anni. Questo aspetto è fondamentale, poiché uno dei principali ostacoli al trattamento di queste patologie è rappresentato dalla difficoltà nel coinvolgere i giovani pazienti in esercizi visivi ripetitivi. Rendere questi esercizi più accessibili e coinvolgenti attraverso la gamification può contribuire significativamente all'aderenza al trattamento.

Il secondo sondaggio, relativo alla predisposizione dei genitori verso la gamification, è stato progettato per valutare le percezioni dei genitori riguardo l'uso dei videogiochi come strumento terapeutico. Questo sondaggio ha raccolto informazioni sull'accettazione di metodi di trattamento non convenzionali, concentrandosi in particolare sui potenziali benefici della gamification nel rendere più attraenti e meno stressanti i trattamenti per i bambini. Considerando l'importanza del coinvolgimento dei genitori nel processo terapeutico, comprendere il loro punto di vista è fondamentale per la riuscita e la sostenibilità di tali approcci.

In entrambi i sondaggi, la partecipazione è stata anonima e volontaria, e i dati sono stati raccolti e analizzati con l'obiettivo di migliorare ulteriormente i giochi sviluppati, garantendo che essi soddisfino le esigenze specifiche dei bambini per il trattamento.

4.2 Sintesi dei risultati

4.2.1 Sondaggio 1: Accessibilità, usabilità e inclusività dei giochi

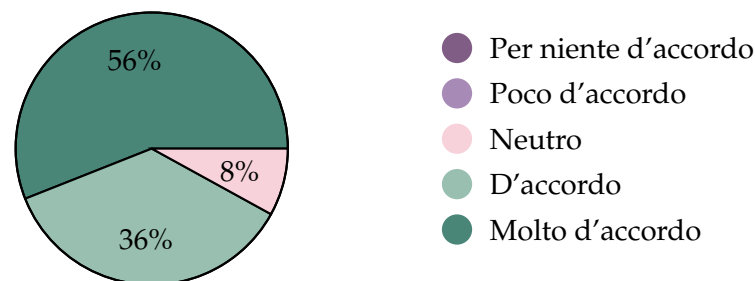
I risultati del sondaggio relativo ad accessibilità, usabilità e inclusività hanno evidenziato che i videogiochi progettati per il trattamento dell'ambliopia e dello strabismo sono stati

generalmente ben accolti dai partecipanti. L'analisi dettagliata delle risposte ha fornito informazioni preziose su vari aspetti dell'esperienza utente.

Comprensione e utilizzo dei giochi

Una delle prime domande ha riguardato la facilità di comprensione e utilizzo dei giochi. Il 56% degli intervistati si è dichiarato "molto d'accordo" sul fatto che i giochi fossero semplici da comprendere e utilizzare, confermando la qualità del design e dell'interfaccia utente. Questo risultato sottolinea come le meccaniche di gioco siano state sviluppate in modo efficace, con una curva di apprendimento adatta ai bambini di età compresa tra i 3 e i 12 anni, target principale di questi giochi.

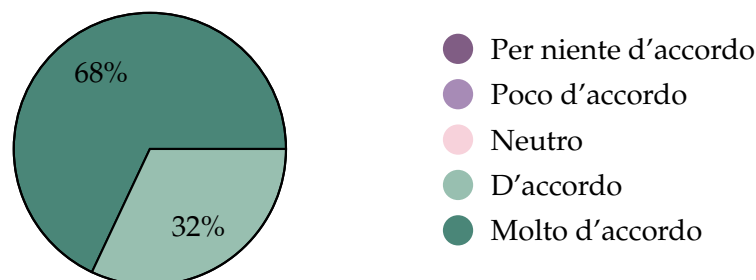
Figura 4.1: Diagramma su comprensione e utilizzo dei giochi



Intuitività senza necessità di ulteriori spiegazioni

In linea con quanto sopra, la domanda sull'intuitività dei giochi ha ottenuto risultati molto positivi. Il 100% dei partecipanti ha confermato che i giochi erano sufficientemente intuitivi da non richiedere ulteriori spiegazioni, una caratteristica molto importante quando si tratta di rendere i giochi accessibili ai bambini. Questa intuitività ha reso possibile un'interazione fluida e senza frustrazioni, permettendo ai giovani pazienti di concentrarsi sugli esercizi visivi senza richiedere un'assistenza costante.

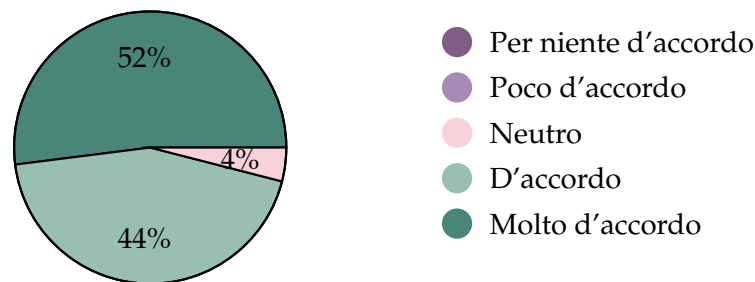
Figura 4.2: Diagramma sull'intuitività



Adeguatezza del design per la fascia d'età 3-12 anni

Un altro aspetto rilevante emerso dal sondaggio riguarda la pertinenza del design rispetto alla fascia d'età 3-12 anni, che rappresenta il gruppo demografico principale per il trattamento dell'ambliopia e dello strabismo. Il 52% degli intervistati si è dichiarato "molto d'accordo" con l'affermazione che il design dei giochi fosse appropriato per i bambini in questa fascia d'età. I colori vivaci e le interfacce semplici sembrano aver centrato l'obiettivo, rendendo i giochi esteticamente gradevoli e stimolanti per i più piccoli.

Figura 4.3: Diagramma sull'adeguatezza del design

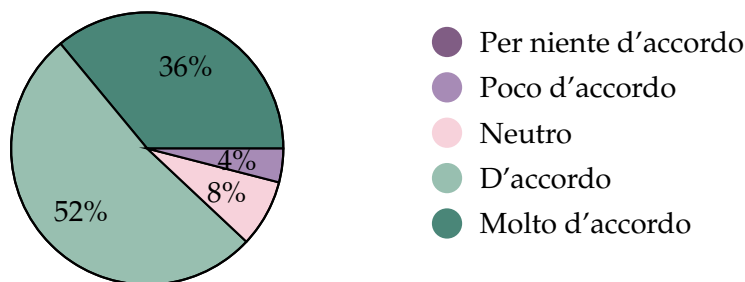


Durata dei giochi e affaticamento visivo

Uno dei punti centrali del sondaggio ha riguardato la durata delle sessioni di gioco, un fattore cruciale quando si considerano trattamenti visivi che possono essere ripetitivi o affaticanti. I risultati sono stati largamente positivi, con l'88% dei partecipanti che ha ritenuto adeguata la durata delle sessioni, segnalando che i giochi erano sufficientemente brevi da mantenere alta l'attenzione e l'interesse, senza causare affaticamento o disagio oculare.

Questo è un risultato particolarmente importante, poiché il trattamento dell'ambliopia spesso richiede periodi prolungati di attività visiva concentrata. Il feedback positivo dimostra che i giochi sono riusciti a trovare un equilibrio tra efficacia terapeutica e piacere ludico, garantendo sessioni brevi ma efficaci per migliorare l'acuità visiva senza sovraccaricare il bambino.

Figura 4.4: Diagramma su durata dei giochi e affaticamento visivo

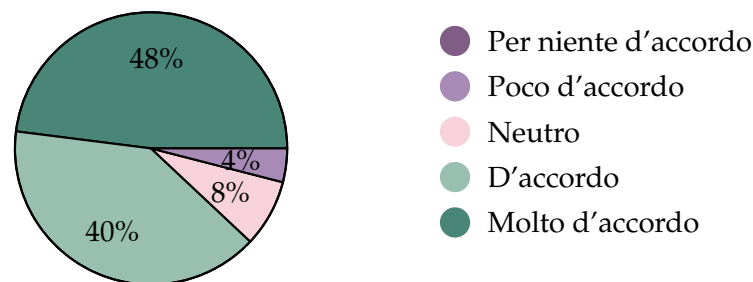


Livello di difficoltà e frustrazione

La gestione della difficoltà dei giochi è risultata anch'essa un fattore ben calibrato. L'88% dei partecipanti ha ritenuto che il livello di difficoltà fosse appropriato, senza risultare eccessivamente frustrante.

Una piccola percentuale (4%) ha invece trovato il livello di difficoltà iniziale troppo elevato, suggerendo che potrebbe essere utile introdurre ulteriori opzioni di personalizzazione del livello di difficoltà o un sistema che si adatti automaticamente alle capacità del giocatore in tempo reale.

Figura 4.5: Diagramma su livello di difficoltà e frustrazione



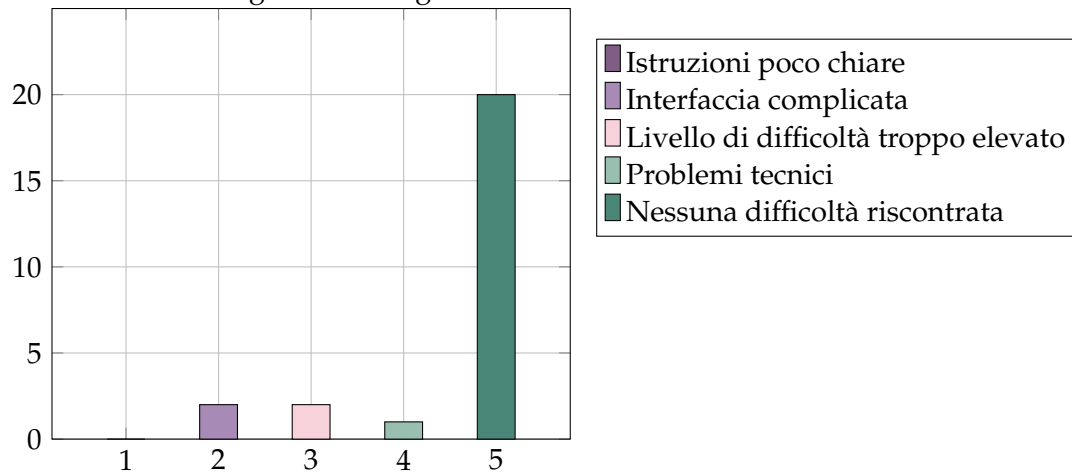
Difficoltà riscontrate nell'utilizzo

Un'analisi più dettagliata delle difficoltà riscontrate ha evidenziato che la maggior parte dei partecipanti (80%) non ha incontrato particolari ostacoli nell'utilizzo dei giochi. Tuttavia, tra coloro che hanno segnalato problemi, i motivi sono stati legati a:

- Istruzioni poco chiare (0%);
- Interfaccia complicata (8%);
- Livello di difficoltà troppo elevato (8%);
- Problemi tecnici (4%).

Questo suggerisce che, pur essendo generalmente ben accolti, ci sono alcuni aspetti che potrebbero essere migliorati per garantire un'esperienza utente più omogenea e priva di frustrazioni. Le istruzioni, in particolare, potrebbero essere ulteriormente semplificate o arricchite con un tutorial interattivo.

Figura 4.6: Diagramma sulle difficoltà riscontrate



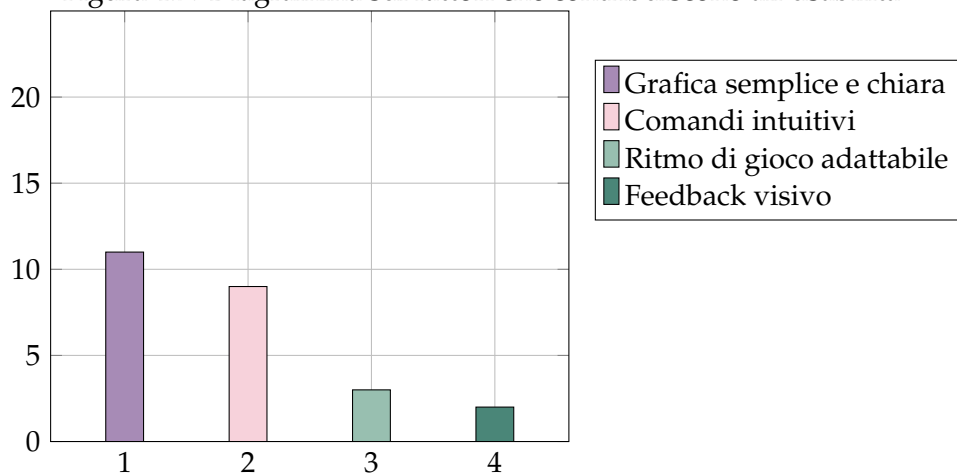
Fattori che contribuiscono all'usabilità

Tra gli elementi che hanno contribuito maggiormente all'usabilità dei giochi, le risposte si sono concentrate su quattro fattori chiave:

- Grafica semplice e chiara (44%);
- Comandi intuitivi (36%);
- Ritmo di gioco adattabile (12%);
- Feedback visivo (8%).

Questi risultati confermano l'importanza di una grafica e un'interfaccia accessibili, soprattutto per un pubblico infantile. Inoltre, i comandi intuitivi hanno avuto un ruolo fondamentale nel mantenere i bambini concentrati e motivati durante il gioco.

Figura 4.7: Diagramma sui fattori che contribuiscono all'usabilità



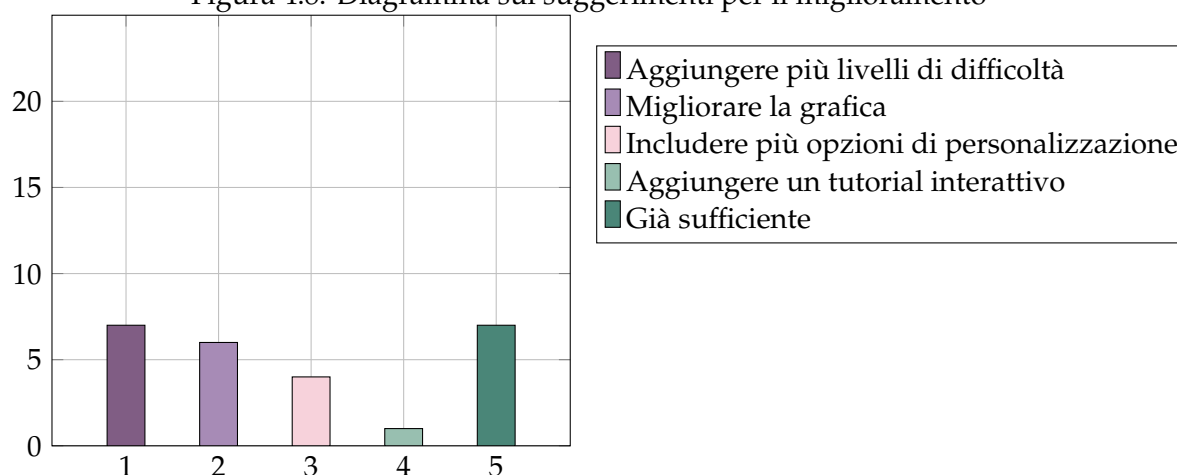
Suggerimenti per il miglioramento

Alla domanda su come i giochi potrebbero essere migliorati per aumentarne l'accessibilità e l'usabilità, i partecipanti hanno fornito numerosi suggerimenti, tra cui:

- Aggiungere più livelli di difficoltà (28%);
- Migliorare la grafica (24%);
- Includere più opzioni di personalizzazione (16%);
- Aggiungere un tutorial interattivo (4%).

Inoltre, è emerso che una percentuale non trascurabile (28%) ha ritenuto che i giochi fossero già sufficientemente accessibili e usabili, suggerendo che la base su cui lavorare è solida, ma ci sono margini per perfezionamenti.

Figura 4.8: Diagramma sui suggerimenti per il miglioramento



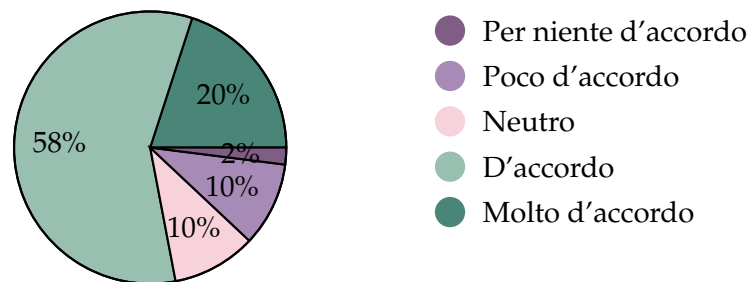
4.2.2 Sondaggio 2: Predisposizione dei genitori verso la gamification

Il secondo sondaggio, rivolto ai genitori dei pazienti, ha indagato la loro predisposizione verso l'uso della gamification nel contesto medico. Anche in questo caso, i risultati sono stati largamente positivi, con una chiara approvazione dell'uso dei videogiochi per migliorare il trattamento dell'ambliopia e dello strabismo.

Aderenza al trattamento

Una delle domande chiave ha riguardato la capacità dei videogiochi terapeutici di migliorare l'aderenza al trattamento. Il 20% dei genitori si è dichiarato "molto d'accordo" e il 58% si è dichiarato "d'accordo" sul fatto che un trattamento basato sui videogiochi possa facilitare il coinvolgimento dei bambini, rendendo più probabile che essi seguano il piano terapeutico prescritto. Questo è un dato rilevante, poiché l'aderenza al trattamento è uno dei maggiori ostacoli nel trattamento dell'ambliopia, soprattutto nei pazienti pediatrici.

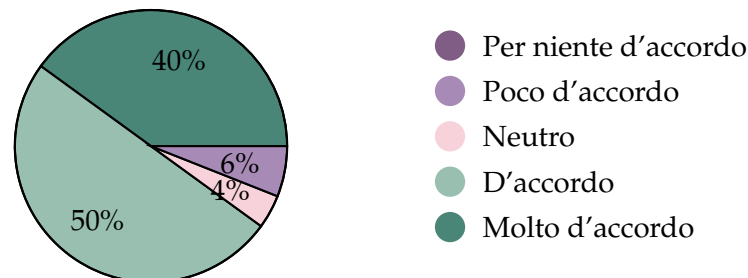
Figura 4.9: Diagramma sull'aderenza al trattamento



Divertimento nel trattamento

Un'ampia percentuale di genitori (90%) ha espresso opinioni favorevoli riguardo la capacità dei videogiochi terapeutici di rendere il trattamento più divertente per i bambini. Questo dato indica che la gamification non solo rappresenta una strategia terapeutica efficace, ma è anche percepita come un mezzo per migliorare l'esperienza complessiva dei pazienti. L'idea che il trattamento possa diventare un'attività piacevole e coinvolgente, anziché una routine noiosa o stressante, è stata largamente condivisa, dimostrando che l'approccio ludico può favorire una maggiore motivazione nei bambini.

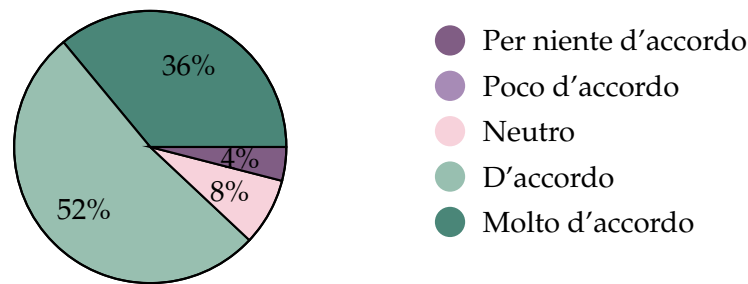
Figura 4.10: Diagramma sul divertimento nel trattamento



Riduzione dello stress e dell'ansia

Un altro aspetto importante del sondaggio è stato l'impatto della gamification sulla riduzione dello stress e dell'ansia associati ai trattamenti tradizionali. L'88% dei genitori ha convenuto che i videogiochi terapeutici possano effettivamente rendere il trattamento meno stressante per i bambini, grazie a un approccio più ludico e meno invasivo rispetto ai metodi convenzionali, come le bende oculari o gli esercizi visivi tradizionali.

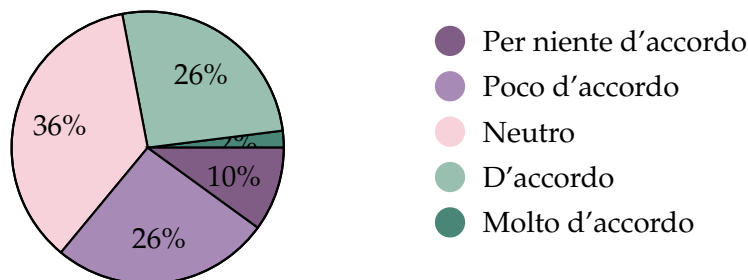
Figura 4.11: Diagramma su riduzione dello stress e dell'ansia



Sfide e preoccupazioni

Nonostante i numerosi aspetti positivi, alcuni genitori hanno manifestato preoccupazioni circa la sostenibilità a lungo termine dei benefici di un trattamento basato sulla gamification. Circa il 28% ha espresso dubbi sul fatto che i bambini possano perdere interesse nei giochi terapeutici nel corso del tempo. Questo dato suggerisce la necessità di continuare a sviluppare giochi che siano dinamici e che offrano una varietà di stimoli per mantenere alto il livello di coinvolgimento anche durante trattamenti a lungo termine.

Figura 4.12: Diagramma sulla preoccupazione sui benefici a lungo termine

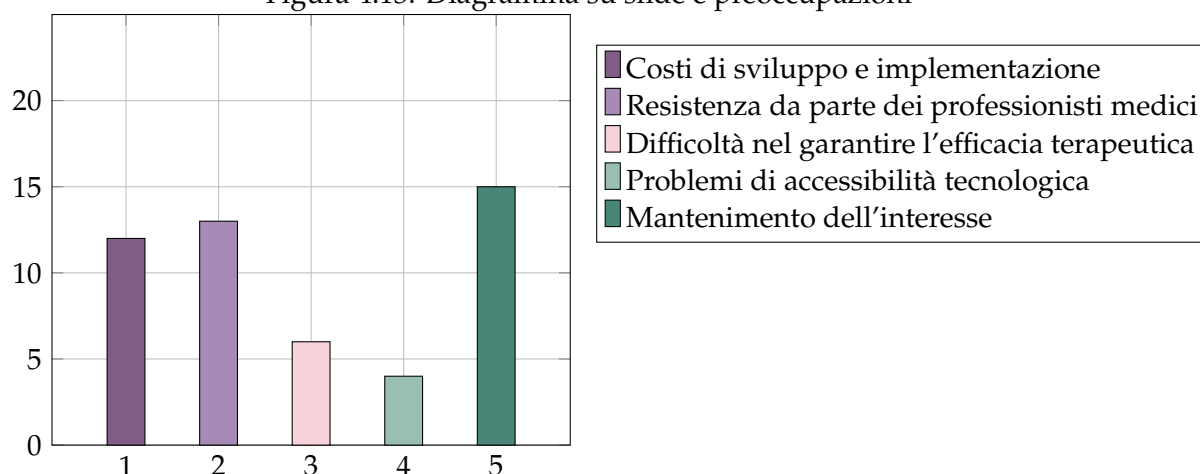


Le altre preoccupazioni emerse riguardano principalmente:

- Costi di sviluppo e implementazione (24%);
- Resistenza da parte dei professionisti medici (26%);
- Difficoltà nel garantire l'efficacia terapeutica (12%);
- Problemi di accessibilità tecnologica (8%);
- Mantenimento dell'interesse del paziente nel lungo periodo (30%).

Questi aspetti mettono in luce alcune sfide nell'implementazione diffusa della gamification nel contesto medico, evidenziando la necessità di ulteriori studi e investimenti per ottimizzare l'integrazione di questo approccio nei trattamenti tradizionali.

Figura 4.13: Diagramma su sfide e preoccupazioni

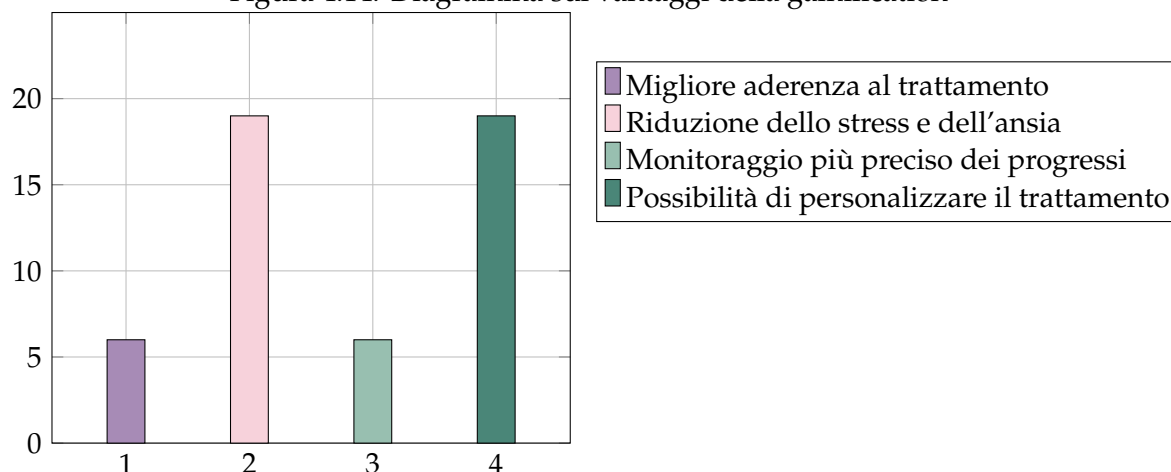


Vantaggi della gamification

I genitori hanno riconosciuto diversi vantaggi nell'uso della gamification per il trattamento dell'ambliopia e dello strabismo. In particolare, le risposte si sono concentrate sui seguenti benefici principali:

- Migliore aderenza al trattamento (12%): Alcuni genitori ritengono che i videogiochi possano aumentare la motivazione dei bambini a seguire il trattamento, rendendolo più piacevole e coinvolgente;
- Riduzione dello stress e dell'ansia (38%): La gamification è vista come un buon modo per alleviare l'ansia associata ai trattamenti tradizionali, trasformandoli in un'esperienza più ludica;
- Monitoraggio più preciso dei progressi (12%): Alcuni genitori hanno evidenziato l'utilità della gamification per tracciare i progressi terapeutici in modo continuo e dettagliato;
- Possibilità di personalizzare il trattamento (38%): La capacità di adattare il gioco alle esigenze specifiche del bambino è stata considerata un vantaggio importante per migliorare l'efficacia del trattamento.

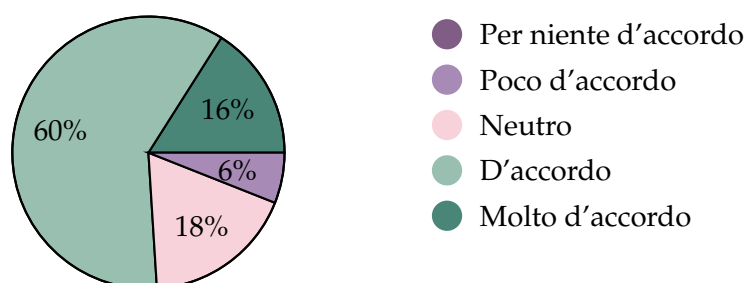
Figura 4.14: Diagramma sui vantaggi della gamification



Integrazione della gamification con i metodi tradizionali

La maggior parte dei genitori (76%) ha affermato che la gamification dovrebbe integrare i metodi tradizionali di trattamento. Questo suggerisce che i videogiochi potrebbero essere utilizzati come un efficace complemento alle terapie esistenti, combinando il meglio di entrambi gli approcci per massimizzare i benefici per i pazienti.

Figura 4.15: Diagramma sull'integrazione della gamification



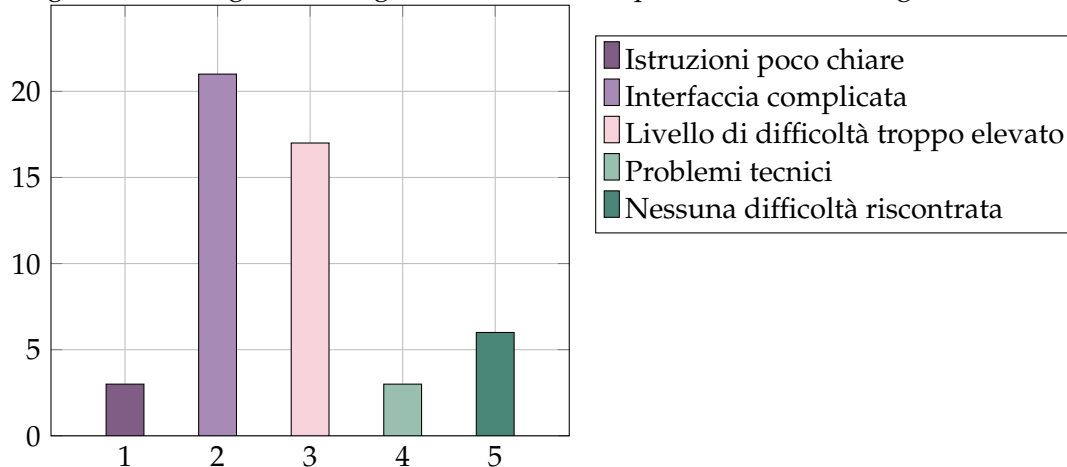
Elementi cruciali per il successo della gamification

Alla domanda su quali caratteristiche fossero considerate più importanti in un videogioco terapeutico, le risposte si sono concentrate su alcuni elementi chiave:

- Grafica accattivante (6%);
- Sfide adattive basate sui progressi del paziente (42%);
- Elementi educativi sulla salute degli occhi (34%);
- Sistema di ricompense e achievement (6%);
- Possibilità di giocare con amici o familiari (12%).

Questi dati confermano che i genitori vedono nei videogiochi terapeutici non solo un mezzo per migliorare la partecipazione dei bambini al trattamento, ma anche un'opportunità per educarli sulla loro condizione visiva e motivarli attraverso il gioco sociale e le ricompense.

Figura 4.16: Diagramma sugli elementi cruciali per il successo della gamification



4.3 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati dei due sondaggi conferma che l'uso della gamification applicata al trattamento dell'ambliopia e dello strabismo ha ottenuto un'accoglienza estremamente positiva sia da parte dei pazienti che dai loro genitori. I risultati forniscono indicazioni importanti non solo sull'efficacia dei giochi in termini di usabilità, accessibilità e inclusività, ma anche sulla loro capacità di migliorare l'aderenza e di ridurre lo stress associato ai trattamenti.

4.3.1 Accessibilità e usabilità dei giochi

Uno dei principali obiettivi di questo studio era comprendere se i videogiochi sviluppati fossero facilmente accessibili e utilizzabili dai bambini, che rappresentano il gruppo target del trattamento. Dai risultati del sondaggio emerge chiaramente che la maggior parte dei partecipanti ha trovato i giochi intuitivi e semplici da utilizzare. Questo aspetto è di fondamentale importanza, poiché una delle maggiori sfide nel trattamento dell'ambliopia e dello strabismo nei pazienti pediatrici è garantire che il processo terapeutico sia percepito come piacevole, piuttosto che come un obbligo medico. L'analisi dei risultati ha evidenziato il successo complessivo dei giochi terapeutici sviluppati per bambini dai 3 ai 12 anni. L'elevata percentuale di partecipanti che ha trovato i giochi adeguati alla fascia d'età target dimostra l'efficacia del design implementato. La durata delle sessioni è risultata appropriata, bilanciando efficacia terapeutica e prevenzione dell'affaticamento visivo e il livello di difficoltà progressivo ha mantenuto l'interesse dei bambini senza causare frustrazione, sebbene si sia evidenziata la necessità di una maggiore personalizzazione. Elementi chiave del successo sono stati la grafica semplice, i comandi intuitivi, il ritmo adattabile e il feedback visivo efficace. I suggerimenti raccolti, come l'introduzione di più livelli di difficoltà, di opzioni

di personalizzazione o miglioramenti grafici offrono spunti preziosi per futuri sviluppi. Nel complesso, i risultati confermano che i giochi rappresentano uno strumento promettente per il trattamento oftalmologico pediatrico, combinando efficacia terapeutica e coinvolgimento dei giovani pazienti.

4.3.2 Predisposizione dei genitori verso la gamification

L'analisi delle risposte fornite dai genitori ha confermato che la gamification è generalmente ben vista come strumento per migliorare il trattamento di ambliopia e strabismo nei bambini. Uno degli aspetti più rilevanti riguarda la convinzione che i videogiochi terapeutici possano aumentare l'aderenza al trattamento. Il dato secondo cui il 78% dei genitori concorda con questa affermazione suggerisce che i genitori vedono nella gamification un mezzo efficace per superare le difficoltà legate alla scarsa motivazione dei bambini. L'analisi dei risultati ha evidenziato i molteplici benefici della gamification nel trattamento oftalmologico pediatrico: i videogiochi terapeutici si sono infatti dimostrati efficaci nel ridurre lo stress e l'ansia associati ai trattamenti tradizionali, offrendo un'alternativa più piacevole e coinvolgente. La maggioranza dei genitori ha espresso un'opinione favorevole riguardo all'uso di questi strumenti, riconoscendone il potenziale nel migliorare l'aderenza al trattamento. Tuttavia, sono emerse anche alcune preoccupazioni, tra cui il possibile calo di interesse nel lungo termine e le sfide legate ai costi di sviluppo e implementazione. I genitori hanno manifestato una preferenza per l'integrazione dei videogiochi terapeutici con i metodi tradizionali, piuttosto che una sostituzione completa. Elementi cruciali per il successo di questi strumenti includono una grafica accattivante, sfide adattive, un sistema di ricompense e l'inclusione di contenuti educativi sulla salute degli occhi. Nonostante le sfide identificate, i risultati indicano che la gamification offre un approccio innovativo e potenzialmente trasformativo nel campo del trattamento oftalmologico pediatrico.

4.4 Conclusioni finali

In sintesi, i dati raccolti attraverso i due sondaggi confermano la validità dell'approccio basato sulla gamification nel trattamento dell'ambliopia e dello strabismo. La maggior parte dei partecipanti ha evidenziato che i giochi sviluppati per la tesi sono accessibili, usabili e inclusivi, il che indica che i principi fondamentali del game design sono stati rispettati e applicati in modo efficace. L'intuitività dei giochi ha facilitato la partecipazione dei bambini, riducendo al minimo le barriere all'ingresso e rendendo l'esperienza piacevole e coinvolgente.

Inoltre, la forte adesione dei genitori alla gamification come metodo di trattamento innovativo rappresenta un ulteriore segnale positivo, suggerendo che l'accettazione di questo approccio potrebbe facilitare la sua diffusione in contesti terapeutici reali. Sebbene siano state sollevate alcune preoccupazioni circa la sostenibilità dei benefici nel lungo termine, l'integrazione di elementi dinamici e adattivi nei giochi potrebbe rispondere a tali sfide, assicurando che il trattamento rimanga efficace e coinvolgente anche su periodi prolungati.

Alla luce di quanto emerso, si può concludere che la gamification rappresenta un'opportunità concreta per migliorare i trattamenti tradizionali per l'ambliopia e lo strabismo, promuovendo un maggiore coinvolgimento dei pazienti e una riduzione dello stress associato alle terapie. Questi risultati incoraggiano a proseguire lungo questa linea di ricerca, esplorando ulteriormente come i videogiochi terapeutici possano essere integrati nei programmi di trattamento oftalmologico per bambini, con l'obiettivo di migliorarne costantemente l'efficacia e l'accessibilità.

Bibliografia

- [1] A. L. Webber e J. Wood. "Amblyopia: prevalence, natural history, functional effects and treatment". In: *Clinical and Experimental Optometry* 88.6 (2005), pp. 365–375. doi: 10.1111/j.1444-0938.2005.tb05102.x.
- [2] Gunter K. von Noorden e Emilio C. Campos. *Binocular Vision and Ocular Motility: Theory and Management of Strabismus*. 6th. Mosby, 2002. url: <https://cybersight.org/library/textbook-von-noorden-campos-2002/>.
- [3] J. H. Tan, J. R. Thompson e I. Gottlob. "Differences in the management of amblyopia between European countries". In: *British Journal of Ophthalmology* 87.3 (mar. 2003), pp. 291–296. doi: 10.1136/bjo.87.3.291.
- [4] A. Searle et al. "Compliance with eye patching in children and its psychosocial effects: A qualitative application of protection motivation theory". In: *Psychology, Health & Medicine* 5.1 (2000), pp. 43–54. doi: 10.1080/135485000105990.
- [5] Andrew Duchowski. *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. 2^a ed. Springer-Verlag London, 2007. isbn: 978-1-84628-609-4. doi: 10.1007/978-1-84628-609-4. url: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-609-4%7D>.
- [6] Christina Gambacorta et al. "An action video game for the treatment of amblyopia in children: A feasibility study". In: *Vision Research* 148 (2018), pp. 1–14. issn: 0042-6989. doi: 10.1016/j.visres.2018.04.005. url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698918300580>.
- [7] Yury Kartynnik et al. "Real-time Facial Surface Geometry from Monocular Video on Mobile GPUs". In: *arXiv preprint arXiv:1907.06724* (2019). doi: 10.48550/arXiv.1907.06724.
- [8] P. Pereira et al. "A Review of Gamification for Health-Related Contexts". In: *Design, User Experience, and Usability. User Experience Design for Diverse Interaction Platforms and Environments*. A cura di A. Marcus. Vol. 8518. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 2014, pp. 665–674. doi: 10.1007/978-3-319-07626-3_70.
- [9] Ben Shneiderman et al. *Designing the User Interface*. 6th. Pearson International, 2017. url: <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292153926>.
- [10] K. Simons. "Amblyopia characterization, treatment, and prophylaxis". In: *Survey of Ophthalmology* 50.2 (mar. 2005), pp. 123–166. doi: 10.1016/j.survophthal.2004.12.005.

- [11] J. R. Thompson et al. "The incidence and prevalence of amblyopia detected in childhood". In: *Public Health* 105.6 (nov. 1991), pp. 455–462. doi: 10.1016/s0033-3506(05)80616-x.
- [12] H. E. Bedell, M. C. Flom e R. Barbeito. "Spatial aberrations and acuity in strabismus and amblyopia". In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 26.7 (lug. 1985), pp. 909–916.
- [13] S. A. Brown et al. "Prevalence of amblyopia and associated refractive errors in an adult population in Victoria, Australia". In: *Ophthalmic Epidemiology* 7.4 (dic. 2000), pp. 249–258.
- [14] M. X. Repka et al. "A randomized trial of patching regimens for treatment of moderate amblyopia in children". In: *Archives of Ophthalmology* 121.5 (mag. 2003), pp. 603–611. doi: 10.1001/archophth.121.5.603.
- [15] J. van Hof-Van Duin et al. "Effects of very low birth weight (VLBW) on visual development during the first year after term". In: *Early Human Development* 20.3-4 (dic. 1989), pp. 255–266. doi: 10.1016/0378-3782(89)90011-x.
- [16] S. P. McKee, D. M. Levi e J. A. Movshon. "The pattern of visual deficits in amblyopia". In: *Journal of Vision* 3.5 (2003), pp. 380–405. doi: 10.1167/3.5.5.
- [17] C. Williams et al. "Amblyopia treatment outcomes after preschool screening vs school entry screening: observational data from a prospective cohort study". In: *British Journal of Ophthalmology* 87.8 (ago. 2003), pp. 988–993. doi: 10.1136/bjo.87.8.988.
- [18] M. Eibschitz-Tsimhoni et al. "Early screening for amblyogenic risk factors lowers the prevalence and severity of amblyopia". In: *Journal of AAPOS* 4.4 (ago. 2000), pp. 194–199. doi: 10.1067/mpa.2000.105274.
- [19] J. Rahi et al. "Risk, causes, and outcomes of visual impairment after loss of vision in the non-amblyopic eye: a population-based study". In: *The Lancet* 360.9333 (ago. 2002), pp. 597–602. doi: 10.1016/s0140-6736(02)09782-9.
- [20] S. K. Snowden e S. L. Stewart-Brown. *Amblyopia and disability: a qualitative study*. Rapp. tecn. Health Services Research Unit, University of Oxford, 1997.
- [21] S. Hrisos et al. "Unilateral visual impairment and neurodevelopmental performance in preschool children". In: *British Journal of Ophthalmology* 90.7 (lug. 2006), pp. 836–838. doi: 10.1136/bjo.2006.090910.
- [22] S. Eustis e D. R. Smith. "Parental understanding of strabismus". In: *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus* 24.5 (set. 1987), pp. 232–236. doi: 10.3928/0191-3913-19870901-08.
- [23] D. Satterfield, J. L. Keltner e T. L. Morrison. "Psychosocial aspects of strabismus study". In: *Archives of Ophthalmology* 111.8 (ago. 1993), pp. 1100–1105. doi: 10.1001/archophth.1993.01090080096024.

- [24] M. J. Moseley et al. "Remediation of refractive amblyopia by optical correction alone". In: *Ophthalmic and Physiological Optics* 22.4 (lug. 2002), pp. 296–299. doi: 10.1046/j.1475-1313.2002.00034.x.
- [25] J. M. Holmes et al. "Risk of amblyopia recurrence after cessation of treatment". In: *Journal of AAPOS: the Official Publication of the American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 8.5 (ott. 2004), pp. 420–428. doi: 10.1016/s1091-8531(04)00161-2.
- [26] L. E. Leguire et al. "Long-term follow-up of L-dopa treatment in children with amblyopia". In: *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus* 39.6 (nov. 2002), pp. 326–330. doi: 10.3928/0191-3913-20021101-05.
- [27] P. Nucci et al. "Compliance in antiamblyopia occlusion therapy". In: *Acta Ophthalmologica (Copenhagen)* 70.1 (feb. 1992), pp. 128–131. doi: 10.1111/j.1755-3768.1992.tb02104.x.
- [28] M. Oliver et al. "Compliance and results of treatment for amblyopia in children more than 8 years old". In: *American Journal of Ophthalmology* 102.3 (set. 1986), pp. 340–345. doi: 10.1016/0002-9394(86)90008-5.
- [29] J. H. Membreno et al. "A cost-utility analysis of therapy for amblyopia". In: *Ophthalmology* 109.12 (dic. 2002), pp. 2265–2271. doi: 10.1016/s0161-6420(02)01286-1.
- [30] Gary Bradski e Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN: 1441412697. doi: 10.5555/1593511.
- [31] Gary Bradski e Adrian Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2008.
- [32] Sloan Kelly e Sloan Kelly. "Basic introduction to pygame". In: *Python, PyGame and Raspberry Pi Game Development* (2016), pp. 59–65.
- [33] Al Sweigart. "Pyautogui documentation". In: *Read the Docs* 25 (2020).
- [34] Nicholas Wade e Benjamin Tatler. *The Moving Tablet of the Eye: The Origins of Modern Eye Movement Research*. Online edn, Oxford Academic, 1 Apr. 2010. Accessed 7 Sept. 2024. Oxford University Press, 2005. doi: 10.1093/acprof:oso/9780198566175.001.0001. URL: <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198566175.001.0001>.
- [35] Nicholas J. Wade, Benjamin W. Tatler e David Heller. "Dodge-ing the issue: Dodge, Javal, Hering, and the measurement of saccades in eye-movement research". In: *Perception* 32.7 (2003), pp. 793–804. doi: 10.1068/p3470.
- [36] E. B. Huey. *The Psychology and Pedagogy of Reading*. 5th. Cambridge, MA: MIT Press, 1908. doi: 10.2307/2011165. URL: <https://doi.org/10.2307/2011165>.
- [37] G. T. Buswell. *How People Look at Pictures: A Study of the Psychology and Perception in Art*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1935.
- [38] Nicholas J. Wade. "Looking at Buswell's pictures". In: *Journal of Eye Movement Research* 13.2 (giu. 2020), 10.16910/jemr.13.2.4. doi: 10.16910/jemr.13.2.4.

- [39] A. L. Yarbus. *Eye Movements and Vision*. Trad. da B. Haigh. Plenum Press, 1967. doi: 10.1007/978-1-4899-5379-7.
- [40] J. F. Mackworth e N. H. Mackworth. "Eye fixations recorded on changing visual scenes by the television eye-marker". In: *Journal of the Optical Society of America* 48.7 (lug. 1958), pp. 439–445. doi: 10.1364/josa.48.000439.
- [41] D. Noton e L. Stark. "Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns". In: *Vision Research* 11.9 (set. 1971), pp. 929–942. doi: 10.1016/0042-6989(71)90213-6.
- [42] L. R. Young e D. Sheena. "Survey of eye movement recording methods". In: *Behavior Research Methods & Instrumentation* 7.5 (1975), pp. 397–429. doi: 10.3758/BF03201553. URL: <https://doi.org/10.3758/BF03201553>.
- [43] Carlos H. Morimoto e Marcio R. M. Mimica. "Eye gaze tracking techniques for interactive applications". In: *Computer Vision and Image Understanding* 98.1 (2005), pp. 4–24. ISSN: 1077-3142. doi: 10.1016/j.cviu.2004.07.010. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1077314204001109>.
- [44] A. T. Duchowski. "A breadth-first survey of eye-tracking applications". In: *Behavior Research Methods, Instruments & Computers* 34.4 (2002), pp. 455–470. doi: 10.3758/BF03195475. URL: <https://doi.org/10.3758/BF03195475>.
- [45] E. D. Guestrin e M. Eizenman. "General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections". In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 53.6 (giu. 2006), pp. 1124–1133. doi: 10.1109/TBME.2005.863952.
- [46] C. H. Morimoto et al. "Pupil detection and tracking using multiple light sources". In: *Image and Vision Computing* 18.4 (2000), pp. 331–335. ISSN: 0262-8856. doi: 10.1016/S0262-8856(99)00053-0. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885699000530>.
- [47] D. W. Hansen e Q. Ji. "In the Eye of the Beholder: A Survey of Models for Eyes and Gaze". In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32.3 (mar. 2010), pp. 478–500. doi: 10.1109/TPAMI.2009.30.
- [48] Moritz Kassner, William Patera e Andreas Bulling. "Pupil: An Open Source Platform for Pervasive Eye Tracking and Mobile Gaze-based Interaction". In: *UbiComp 2014 - Adjunct Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*. ACM, 2014. doi: 10.1145/2638728.2641695.
- [49] Keith Rayner. "Eye movements in reading and information processing: 20 years of research". In: *Psychological Bulletin* 124.3 (nov. 1998), pp. 372–422. doi: 10.1037/0033-2909.124.3.372.
- [50] Marcel Adam Just e Patricia A. Carpenter. "Eye fixations and cognitive processes". In: *Cognitive Psychology* 8.4 (1976), pp. 441–480. ISSN: 0010-0285. doi: 10.1016/0010-0285(76)90015-3. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010028576900153>.

- [51] Oleg Špakov e Darius Miniotas. "Visualization of eye gaze data using heat maps". In: *ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA* T. 115 (2007). ISSN: 1392-1215.
- [52] Andrew T. Duchowski. "A breadth-first survey of eye-tracking applications". In: *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* 34.4 (2002), pp. 455–470. DOI: 10.3758/bf03195475.
- [53] Eileen Kowler. "Eye movements: The past 25 years". In: *Vision Research* 51.13 (2011), pp. 1457–1483. ISSN: 0042-6989. DOI: 10.1016/j.visres.2010.12.014. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698910005924>.
- [54] Keith Rayner. "Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search". In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology (Hove)* 62.8 (2009), pp. 1457–1506. DOI: 10.1080/17470210902816461. URL: <https://doi.org/10.1080/17470210902816461>.
- [55] Erik D. Reichle, Keith Rayner e Alexander Pollatsek. "The E-Z reader model of eye-movement control in reading: comparisons to other models". In: *Behavioral and Brain Sciences* 26.4 (2003). discussion 477–526, pp. 445–476. DOI: 10.1017/s0140525x03000104. URL: <https://doi.org/10.1017/s0140525x03000104>.
- [56] Manuel G. Calvo e Lauri Nummenmaa. "Detection of emotional faces: salient physical features guide effective visual search". In: *Journal of Experimental Psychology: General* 137.3 (2008), pp. 471–494. DOI: 10.1037/a0012771. URL: <https://doi.org/10.1037/a0012771>.
- [57] Ami Klin et al. "Visual fixation patterns during viewing of naturalistic social situations as predictors of social competence in individuals with autism". In: *Archives of General Psychiatry* 59.9 (2002), pp. 809–816. DOI: 10.1001/archpsyc.59.9.809. URL: <https://doi.org/10.1001/archpsyc.59.9.809>.
- [58] Terje Falck-Ytter, Sven Bölte e Gustaf Gredebäck. "Eye tracking in early autism research". In: *Journal of Neurodevelopmental Disorders* 5.1 (2013), p. 28. DOI: 10.1186/1866-1955-5-28. URL: <https://doi.org/10.1186/1866-1955-5-28>.
- [59] Michel Wedel e Rik Pieters. "Eye tracking for visual marketing". In: *Foundations and Trends in Marketing* 1.4 (2008), pp. 231–320. DOI: 10.1561/17000000011. URL: <https://doi.org/10.1561/17000000011>.
- [60] Rik Pieters e Luk Warlop. "Visual attention during brand choice: The impact of time pressure and task motivation". In: *International Journal of Research in Marketing* 16.1 (1999), pp. 1–16. ISSN: 0167-8116. DOI: 10.1016/S0167-8116(98)00022-6. URL: [https://doi.org/10.1016/S0167-8116\(98\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8116(98)00022-6).
- [61] Tânia Teixeira, Michel Wedel e Rik Pieters. "Emotion-induced engagement in internet video advertisements". In: *Journal of Marketing Research* 49.2 (2012), pp. 144–159. DOI: 10.1509/jmr.10.0207. URL: <https://doi.org/10.1509/jmr.10.0207>.

- [62] Jesper Clement. "Visual influence on in-store buying decisions: An eye-track experiment on the visual influence of packaging design". In: *Journal of Marketing Management* 23 (2007), pp. 917–928. doi: 10.1362/026725707X250395.
- [63] Patricia Huddleston et al. "Seeking attention: An eye tracking study of in-store merchandise displays". In: *International Journal of Retail & Distribution Management* 43.6 (2015), pp. 561–574. doi: 10.1108/IJRDM-06-2013-0120.
- [64] Tobias Otterbring, Erik Wästlund e Anders Gustafsson. "Eye-tracking customers' visual attention in the wild: Dynamic gaze behavior moderates the effect of store familiarity on navigational fluency". In: *Journal of Retailing and Consumer Services* 28 (2016), pp. 165–170. doi: 10.1016/j.jretconser.2015.09.004.
- [65] Claudia Ehmke e Stephanie Wilson. "Identifying Web Usability Problems from Eye-Tracking Data". In: *Proceedings of the HCI 2007*. 2007. doi: 10.14236/ewic/HCI2007.12.
- [66] Virginio Cantoni et al. "Banner Positioning in the Masthead Area of Online Newspapers: An Eye Tracking Study". In: *ACM International Conference Proceeding Series*. Vol. 767. ACM, 2013, pp. 145–152. doi: 10.1145/2516775.2516789.
- [67] P. Kiefer et al. "Eye Tracking for Spatial Research: Cognition, Computation, Challenges". In: *Spatial Cognition and Computation* 17.1-2 (2017), pp. 1–19. doi: 10.1080/13875868.2016.1254634.
- [68] David P. Crabb et al. "Exploring Eye Movements in Patients with Glaucoma When Viewing a Driving Scene". In: *PLoS ONE* 5.3 (mar. 2010), e9710. doi: 10.1371/journal.pone.0009710.
- [69] G. Virgili et al. "Reading Performance in Patients with Retinitis Pigmentosa: A Study Using the MNREAD Charts". In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 45.10 (ott. 2004), pp. 3418–3424. doi: 10.1167/iovs.04-0390.
- [70] F. F. Ghasia et al. "Cross-Coupled Eye Movement Supports Neural Origin of Pattern Strabismus". In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 56.5 (mag. 2015), pp. 2855–2866. doi: 10.1167/iovs.15-16371.
- [71] David P. Crabb, Nicholas D. Smith e Haoyang Zhu. "What's on TV? Detecting Age-Related Neurodegenerative Eye Disease Using Eye Movement Scanpaths". In: *Frontiers in Aging Neuroscience* 6 (nov. 2014), p. 312. doi: 10.3389/fnagi.2014.00312.
- [72] H. Kimmig et al. "Relationship between Saccadic Eye Movements and Cortical Activity as Measured by fMRI: Quantitative and Qualitative Aspects". In: *Experimental Brain Research* 141.2 (nov. 2001), pp. 184–194. doi: 10.1007/s002210100844.
- [73] R. J. Molitor, P. C. Ko e B. A. Ally. "Eye Movements in Alzheimer's Disease". In: *Journal of Alzheimer's Disease* 44.1 (2015), pp. 1–12. doi: 10.3233/JAD-141173.
- [74] Samuel Almeida, Oscar Mealha e Ana Veloso. "Video Game Scenery Analysis with Eye Tracking". In: *Entertainment Computing* 14 (2011). doi: 10.1016/j.entcom.2015.12.001.

- [75] V. Clay, P. König e S. König. "Eye Tracking in Virtual Reality". In: *Journal of Eye Movement Research* 12.1 (2019), 10.16910/jemr.12.1.3. doi: 10.16910/jemr.12.1.3.
- [76] Yanchao Dong et al. "Driver Inattention Monitoring System for Intelligent Vehicles: A Review". In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (2011), pp. 596–614. doi: 10.1109/TITS.2010.2092770.
- [77] Tim Horberry et al. "Driver distraction: the effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance". In: *Accident Analysis & Prevention* 38.1 (2006), pp. 185–191. doi: 10.1016/j.aap.2005.09.007.
- [78] Panagiotis Konstantopoulos, Philip Chapman e David Crundall. "Driver's visual attention as a function of driving experience and visibility. Using a driving simulator to explore drivers' eye movements in day, night and rain driving". In: *Accident Analysis & Prevention* 42.3 (2010), pp. 827–834. doi: 10.1016/j.aap.2009.09.022.
- [79] D. S. W. Ting et al. "Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology". In: *Br J Ophthalmol* 103.2 (2019), pp. 167–175. doi: 10.1136/bjophthalmol-2018-313173. eprint: 20180ct25.
- [80] J. Rajendran et al. "Comparison of Measurements Between Manual and Automated Eye-Tracking Systems in Patients with Strabismus - A Preliminary Study". In: *Indian Journal of Ophthalmology* 70.10 (ott. 2022), pp. 3625–3628. doi: 10.4103/ijo.IJO_487_22.
- [81] S. P. Donahue et al. "Guidelines for Automated Preschool Vision Screening: A 10-Year, Evidence-Based Update". In: *Journal of AAPOS* 17.1 (feb. 2013), pp. 4–8. doi: 10.1016/j.jaapos.2012.09.012.
- [82] E. E. Birch, K. R. Kelly e J. Wang. "Recent Advances in Screening and Treatment for Amblyopia". In: *Ophthalmology and Therapy* 10.4 (dic. 2021), pp. 815–830. doi: 10.1007/s40123-021-00394-7.
- [83] Z. Chen et al. "Strabismus Recognition Using Eye-Tracking Data and Convolutional Neural Networks". In: *Journal of Healthcare Engineering* (26 apr. 2018), p. 7692198. doi: 10.1155/2018/7692198.
- [84] Z. Csizek et al. "Artificial Intelligence-Based Screening for Amblyopia and Its Risk Factors: Comparison with Four Classic Stereovision Tests". In: *Frontiers in Medicine* 10 (22 dic. 2023), p. 1294559. doi: 10.3389/fmed.2023.1294559.
- [85] S. T. Chung et al. "Characteristics of Fixational Eye Movements in Amblyopia: Limitations on Fixation Stability and Acuity?" In: *Vision Research* 114 (set. 2015), pp. 87–99. doi: 10.1016/j.visres.2015.01.016.
- [86] Kenneth Holmqvist, Marcus Nyström e Fiona Mulvey. "Eye Tracker Data Quality: What It Is and How to Measure It". In: *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*. ACM, 2012, pp. 43–50. doi: 10.1145/2168556.2168563.

- [87] Wolfgang Fuhl et al. "Pupil Detection for Head-Mounted Eye Tracking in the Wild: An Evaluation of the State of the Art". In: *Machine Vision and Applications* 27.8 (nov. 2016), pp. 1275–1288. doi: 10.1007/s00138-016-0776-4.
- [88] Dipak P. Upadhyaya et al. "A 360° View for Large Language Models: Early Detection of Amblyopia in Children using Multi-View Eye Movement Recordings". In: *Artificial Intelligence in Medicine (AIME 2024)* (2024). Originally published in medRxiv: <https://doi.org/10.1101/2024.05.03.24306688>. doi: 10.1007/978-3-031-66535-6_19.
- [89] D.C. Niehorster, R.S. Hessels e J.S. Benjamins. "GlassesViewer: Open-source software for viewing and analyzing data from the Tobii Pro Glasses 2 eye tracker". In: *Behavior Research Methods* 52.3 (2020), pp. 1244–1253. doi: 10.3758/s13428-019-01314-1.
- [90] Taro Handa et al. "Modified iPad for treatment of amblyopia: a preliminary study". In: *Journal of AAPOS* 19.6 (dic. 2015), pp. 552–554. doi: 10.1016/j.jaapos.2015.08.008.
- [91] Adam Nowak et al. "Towards Amblyopia Therapy Using Mixed Reality Technology". In: *Proceedings of the 2018 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. IEEE, 2018, pp. 279–282. doi: 10.15439/2018F335.
- [92] N. Nixon, P.B.M. Thomas e P.R. Jones. "Feasibility study of an automated Strabismus screening Test using Augmented Reality and Eye-tracking (STARE)". In: *Eye (Lond)* 37.17 (dic. 2023), pp. 3609–3614. doi: 10.1038/s41433-023-02566-0.
- [93] F. Liu et al. "Defects and asymmetries in the visual pathway of non-human primates with natural strabismus and amblyopia". In: *Zool Res* 44.1 (gen. 2023), pp. 153–168. doi: 10.24272/j.issn.2095-8137.2022.254.
- [94] J. Li et al. "Dichoptic training improves contrast sensitivity in adults with amblyopia". In: *Vision Res* 114 (set. 2015), pp. 161–172. doi: 10.1016/j.visres.2015.01.017.
- [95] C.J. Hernández-Rodríguez et al. "Stimuli Characteristics and Psychophysical Requirements for Visual Training in Amblyopia: A Narrative Review". In: *J Clin Med* 9.12 (dic. 2020), p. 3985. doi: 10.3390/jcm9123985.
- [96] J. Michael Williams e Robert C. Killeen. "Clinical use of the Vivid Vision system to treat disorders of binocular vision". In: *Semantics Scholar* (2021). URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Clinical-use-of-the-Vivid-Vision-system-to-treat-of/6622b0402792bae40fb944c88bc270057b8bf4f3>.
- [97] Indu Vedamurthy et al. "A dichoptic custom-made action video game as a treatment for adult amblyopia". In: *Vision Research* 114 (2015), pp. 173–187. doi: 10.1016/j.visres.2015.04.008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.04.008>.
- [98] Eileen E. Birch et al. "Binocular amblyopia treatment with contrast-rebalanced movies". In: *Journal of AAPOS* 23.3 (2019), 160.e1–160.e5. doi: 10.1016/j.jaapos.2019.02.007. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaapos.2019.02.007>.
- [99] M. J. Kooiker et al. "A Method to Quantify Visual Information Processing in Children Using Eye Tracking". In: *J Vis Exp* 113 (2016), p. 54031. doi: 10.3791/54031.

- [100] A. J. Ross et al. "Evaluation and development of a novel binocular treatment (I-BiT™) system using video clips and interactive games to improve vision in children with amblyopia ('lazy eye'): study protocol for a randomised controlled trial". In: *Trials* 14 (2013), p. 145. doi: 10.1186/1745-6215-14-145. URL: <https://doi.org/10.1186/1745-6215-14-145>.
- [101] M. Bossi et al. "Binocular Therapy for Childhood Amblyopia Improves Vision Without Breaking Interocular Suppression". In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 58.7 (2017), pp. 3031–3043. doi: 10.1167/iovs.16-20913.
- [102] R. F. Hess, B. Mansouri e B. Thompson. "A new binocular approach to the treatment of amblyopia in adults well beyond the critical period of visual development". In: *Restorative Neurology and Neuroscience* 28.6 (2010), pp. 793–802. doi: 10.3233/RNN-2010-0550.
- [103] P. Žiak et al. "Amblyopia treatment of adults with dichoptic training using the virtual reality oculus rift head mounted display: preliminary results". In: *BMC Ophthalmology* 17.1 (2017), p. 105. doi: 10.1186/s12886-017-0501-8.
- [104] K. R. Kelly et al. "Binocular iPad Game vs Patching for Treatment of Amblyopia in Children: A Randomized Clinical Trial". In: *JAMA Ophthalmology* 134.12 (2016), pp. 1402–1408. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2016.4224.
- [105] N. Herbison et al. "Randomised controlled trial of video clips and interactive games to improve vision in children with amblyopia using the I-BiT system". In: *British Journal of Ophthalmology* 100.11 (2016), pp. 1511–1516. doi: 10.1136/bjophthalmol-2015-307798.
- [106] Sjoukje Loudon et al. "Rapid, High-Accuracy Detection of Strabismus and Amblyopia Using the Pediatric Vision Scanner". In: *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 52 (2011), pp. 5043–5048. doi: 10.1167/iovs.11-7503.
- [107] Shihong Xiao et al. "Fully automated, deep learning segmentation of oxygen-induced retinopathy images". In: *JCI Insight* 2.24 (2017), e97585. doi: 10.1172/jci.insight.97585.
- [108] Rishabh Kapoor, Bruce T. Whigham e Layla A. Al-Aswad. "Artificial Intelligence and Optical Coherence Tomography Imaging". In: *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)* 8.2 (2019), pp. 187–194. doi: 10.22608/APO.201904.
- [109] Shuanglong Li et al. "Binocular iPad treatment of amblyopia for lasting improvement of visual acuity". In: *JAMA Ophthalmol* 133.4 (2015), pp. 479–480. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2014.5515.
- [110] Edwin E. Catmull e J. Clark. "Recursively generated B-spline surfaces on arbitrary topological meshes". In: *Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field* (1978). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:121149868>.

- [111] Valentin Bazarevsky et al. "BlazeFace: Sub-millisecond Neural Face Detection on Mobile GPUs". In: *arXiv preprint arXiv:1907.05047* (2019). doi: 10.48550/arXiv.1907.05047.
- [112] Géry Casiez, Nicolas Roussel e Daniel Vogel. "1€ filter: a simple speed-based low-pass filter for noisy input in interactive systems". In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2012). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:207194683>.
- [113] D. Lenihan. "Health Games: A Key Component for the Evolution of Wellness Programs". In: *Games Health J.* 1.3 (giu. 2012), pp. 233–235. doi: 10.1089/g4h.2012.0022.
- [114] Adrián Domínguez et al. "Gamifying learning experiences: Practical implications and outcomes". In: *Computers & Education* 63 (2013), pp. 380–392. ISSN: 0360-1315. doi: 10.1016/j.compedu.2012.12.020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360131513000031>.
- [115] D. Palmer, S. Lunceford e A.J. Patton. "The engagement economy: How gamification is reshaping businesses". In: *Deloitte Review* 11 (2012). URL: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/the-engagement-economy-how-gamification-is-reshaping-businesses/US_deloittereview_The_Engagement_Economy_Jul12.pdf.
- [116] E. Biddiss e J. Irwin. "Active video games to promote physical activity in children and youth: a systematic review". In: *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine* 164.7 (lug. 2010), pp. 664–672. doi: 10.1001/archpediatrics.2010.104.
- [117] Dana Mezad-Koursh et al. "Home use of binocular dichoptic video content device for treatment of amblyopia: a pilot study". In: *J AAPOS* 22.2 (2018), 134–138.e4. doi: 10.1016/j.jaapos.2017.12.012.
- [118] E. E. Birch et al. "Binocular iPad treatment for amblyopia in preschool children". In: *J AAPOS* 19.1 (2015), pp. 6–11. doi: 10.1016/j.jaapos.2014.09.009.
- [119] T. Mahlen e R. W. Arnold. "Pediatric Non-Refractive Vision Screening with EyeSwift, PDI Check and Blinq: Non-Refractive Vision Screening with Two Binocular Video Games and Birefringent Scanning". In: *Clin Ophthalmol* 16 (2022), pp. 375–384. doi: 10.2147/OPTH.S344751.
- [120] R. W. Li et al. "Video-game play induces plasticity in the visual system of adults with amblyopia". In: *PLoS Biol* 9.8 (2011), e1001135. doi: 10.1371/journal.pbio.1001135.
- [121] R. F. Hess et al. "The iPod binocular home-based treatment for amblyopia in adults: efficacy and compliance". In: *Clin Exp Optom* 97.5 (2014), pp. 389–398. doi: 10.1111/cxo.12192.
- [122] Anil Jain, Karthik Nandakumar e Arun Ross. "Score normalization in multimodal biometric systems". In: *Pattern Recognition* 38.12 (2005), pp. 2270–2285.

Ringraziamenti

Al termine di questo percorso di studi, desidero esprimere i miei ringraziamenti a coloro che hanno contribuito al raggiungimento di questo importante traguardo.

Ringrazio il Professor Fabio Narducci, relatore di questa tesi, per la guida e il supporto forniti durante la ricerca e la stesura del lavoro. Un ringraziamento va anche alla Dottoressa Carmen Bisogni, correlatrice, per i suoi preziosi suggerimenti.

Desidero inoltre esprimere la mia sincera gratitudine a tutti i docenti del corso di laurea che hanno plasmato il mio percorso accademico. La loro dedizione, competenza e passione per l'insegnamento hanno non solo ampliato le mie conoscenze, ma anche stimolato la mia curiosità intellettuale, spingendomi a superare i miei limiti e a raggiungere nuovi orizzonti di apprendimento.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, che mi hanno sostenuto in ogni momento del percorso universitario, offrendomi supporto morale ed emotivo nei momenti più impegnativi.

Voglio esprimere la mia più profonda gratitudine al mio fidanzato, Antonio. La sua pazienza, il suo sostegno incondizionato e la capacità di essermi accanto, anche nei momenti più impegnativi, sono stati determinanti per permettermi di affrontare questo percorso con serenità e determinazione.

Un sincero ringraziamento va ai miei colleghi di corso, con i quali ho condiviso non solo momenti di studio intenso, ma anche gioie, preoccupazioni e successi. La loro collaborazione, il confronto quotidiano e lo spirito di squadra hanno reso questa esperienza universitaria ancora più arricchente e indimenticabile.

Infine, vorrei ringraziare i miei amici per il loro sostegno e per aver creduto in me, anche nei momenti di maggiore difficoltà.

A tutti voi, grazie di cuore.