

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
Ingegneria Informatica (Computer Engineering)

Tesi di Laurea Magistrale

Confronto tra interfacce di eye-tracking e BCI per la selezione di target in Realtà Aumentata Proiettata



Relatori

Andrea Sanna

Francesco De Pace

Federico Manuri

Hannes Kaufmann

Candidato

Simone Formica

Anno Accademico 2023-2024

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine al Professore Andrea Sanna per avermi offerto l'opportunità di vivere questa esperienza di vita unica e preziosa, che porterò sempre nel cuore.

Ringrazio il ricercatore Federico Manuri per i consigli forniti durante questa esperienza.

Un ringraziamento speciale va al ricercatore Francesco De Pace, che mi ha supportato e sopportato durante la mia permanenza a Vienna. La sua disponibilità e la sua pazienza sono stati essenziali per superare le sfide incontrate lungo il cammino.

Ringrazio infine il Professore Hannes Kaufmann per avermi accolto e ospitato all'Università Tecnica di Vienna.

Desidero dedicare questo traguardo alle persone che mi hanno costantemente supportato per raggiungerlo.

Alla mia famiglia, il pilastro fondamentale della mia vita, che ha sempre creduto in me e mi ha insegnato a non mollare. Grazie per il vostro infinito supporto e per avermi dato la possibilità di arrivare fin qui. Grazie per avermi sempre motivato a volare in alto aspirando a raggiungere obiettivi sempre più ambiziosi. Il vostro costante sostegno e la volontà di rendervi orgogliosi hanno prevalso su qualsiasi difficoltà. Vi sarò eternamente grato per esserci sempre stati.

A mia nonna Rosa, ovunque tu sia, perché so che staresti sorridendo e pensando a cosa darmi da mangiare perché mi vedi troppo sciupato.

A Irene, per il tuo inestimabile sostegno durante questo percorso. Grazie per avermi sempre motivato a dare il massimo, per aver sempre creduto in me e per avermi spronato a inseguire i miei sogni, riportandomi con i piedi per terra quando necessario. Grazie per tutti gli "in bocca al lupo" prima degli esami e per la tua sicurezza nel dirmi "so che ce la farai". Grazie per avermi insegnato che volere è potere.

A tutti i miei amici e tutte le persone speciali che ho incontrato e che hanno condiviso con me le sfide e le gioie di questo percorso, offrendo preziosi consigli e momenti di svago, rendendo questi anni più piacevoli e significativi e facendomi capire il vero valore della parola amicizia.

A me stesso, per essere riuscito a portare a termine anche ciò che mi sembrava impossibile, per non essermi lasciato abbattere quando le cose non vanno come si vorrebbe. Alla mia ansia, ai miei sacrifici, ai miei sogni e alla mia determinazione.

*Accendi un sogno e lascialo bruciare in te
-William Shakespeare*

Abstract

L'obiettivo di questo progetto è confrontare un'interfaccia basata sull'eye-tracking con una Brain Computer Interface (BCI) che utilizza la tecnologia SSVEP per la selezione di target. I target saranno visualizzati tramite un sistema di Realtà Aumentata proiettata. I dispositivi utilizzati per il confronto sono stati NextMind, una BCI che consente il controllo di dispositivi tramite segnali cerebrali, e HoloLens 2 di Microsoft, un visore di realtà aumentata dotato di eye-tracking. Per eseguire il confronto sono stati condotti dei test in cui gli utenti dovevano eseguire diversi task per selezionare target statici e dinamici, con e senza la presenza di distrattori. Il confronto tra le due interfacce viene valutato in termini di accuratezza, velocità di selezione e facilità d'uso, al fine di determinare quale delle due tecnologie offra migliori prestazioni per l'interazione in ambienti di Realtà Aumentata proiettata. I risultati preliminari indicano che, sebbene entrambi i dispositivi siano in grado di svolgere i compiti proposti, gli utenti hanno manifestato una preferenza per HoloLens 2 in termini di accuratezza, comodità e semplicità di utilizzo. Questi risultati forniscono indicazioni preziose per lo sviluppo di sistemi di interazione più efficaci in applicazioni di Realtà Aumentata proiettata.

Indice

Elenco delle figure	IV
Elenco delle tabelle	V
Acronimi	VI
1 Introduzione	1
1.1 Organizzazione dei capitoli	3
2 Stato dell'Arte	4
2.1 Realtà Aumentata e Realtà Aumentata Proiettata	4
2.2 BCI e EEG-SSVEP	7
2.3 Eye-tracking	13
3 Selezione di target	16
3.1 Introduzione	16
3.2 Selezione di target tramite mouse	17
3.3 Selezione di target tramite voce	17
3.4 Selezione di target tramite BCI	18
3.5 Selezione di target tramite dispositivi HMD	18
4 Tecnologie	21
4.1 Tecnologie Hardware	21
4.1.1 Proiettore laser	21
4.1.2 HoloLens 2	22
4.1.3 NextMind	23
4.2 Tecnologie Software	25
4.2.1 Unity	25
4.2.2 Mixed Reality Toolkit	26
4.2.3 Vuforia Engine	26
4.2.4 Riptide Networking	28
5 Progettazione e Sviluppo	29
5.1 Introduzione	29
5.2 Interfacce utente	29
5.3 Applicazione NextMind	31
5.3.1 Calibrazione	31
5.3.2 Architettura del sistema	33

5.3.3 Diagramma di flusso selezione NeuroTag con NextMind	34
5.4 Applicazione HoloLens 2	35
5.4.1 Calibrazione	35
5.4.2 Architettura di rete client-server	35
5.4.3 Riptide Networking	36
5.4.4 Server	37
5.4.5 Client	37
5.4.6 Architettura del sistema	38
5.4.7 Diagramma di flusso selezione target con HoloLens 2	39
6 Test e risultati	40
6.1 Test	40
6.1.1 Procedura	40
6.1.2 Consenso informato e questionario iniziale	41
6.1.3 Briefing iniziale	42
6.1.4 Sessione di test	43
6.1.5 Metodologia Latin Square	46
6.2 Risultati	47
6.2.1 Test Statico	47
6.2.2 Test Dinamico	50
6.3 Analisi dei risultati	55
7 Conclusioni e sviluppi futuri	57
7.1 Conclusioni	57
7.2 Sviluppi futuri	58
A Controlli sistema	60
Bibliografia	61
Sitografia	64

Elenco delle figure

Figura 1 AR-VR Continuum	5
Figura 2 Utilizzo del sistema MirageTable	5
Figura 3 Utilizzo del sistema Room2Room	6
Figura 4 Schema del sistema Robot-BCI-Proiettore	6
Figura 5 Operazioni base di un sistema BCI	7
Figura 6 Esempio di BCI non invasiva	8
Figura 7 Schema di controllo della sedia a rotelle	9
Figura 8 Schema controllo braccio robotico mediante BCI	10
Figura 9 Controllo del robot umanoide Asimo mediante BCI	11
Figura 10 Interfaccia del sistema rBCI-pBCI	12
Figura 11 Sistema per il controllo del braccio robotico	12
Figura 12 Utilizzo combinato di NextMind e HoloLens 2	13
Figura 13 Funzionamento di un Video-Based CR eye tracker	13
Figura 14 Utilizzo del sistema eye-tracking e EMG	14
Figura 15 Sistema basato su eye-tracking in AR per il controllo di mani protesiche multi-presa	14
Figura 16 Elementi proiettati su Magic Leap One durante il test	15
Figura 17 Legge di Fitts	16
Figura 18 Esempio di selezione vocale usando il metodo selezione per regione	17
Figura 19 Selezione con diverse modalità di input	19
Figura 20 Modelli Double- ISO (sinistra) e modello Random-WEB (destra) utilizzati durante i test	19
Figura 21 Proiettore laser LG HF80LA	21
Figura 22 Microsoft HoloLens 2	22
Figura 23 Dispositivo NextMind	23
Figura 24 Esempio di NeuroTag	24
Figura 25 Gestione del NeuroManager della comunicazione tra NeuroTags e NextMind	25
Figura 26 Unity UI	26
Figura 27 Esempi di image targets usati da Vuforia	27
Figura 28 Posizionamento Image Target durante i test	27
Figura 29 Interfaccia Utente Applicazione NextMind	30
Figura 30 Interfaccia Utente Applicazione HoloLens 2	30
Figura 31 Prova Utente Applicazione HoloLens2	30
Figura 32 Controllo qualità contatti NextMind	31
Figura 33 NeuroTag selezionato durante la calibrazione	31
Figura 34 Risultato Calibrazione	32
Figura 35 Architettura del sistema Proiettore-Computer-NextMind	33
Figura 36 Diagramma di flusso selezione NeuroTag con NextMind	34
Figura 37 Elementi visivi mostrati durante la calibrazione	35
Figura 38 Architettura di rete client-server	36
Figura 39 Architettura del sistema Proiettore-Computer-HoloLens2	38
Figura 40 Diagramma di flusso selezione target con HoloLens 2	39
Figura 41 Grafico occorrenze età	41
Figura 42 Rappresentazione grafica dei disturbi visivi riscontrati tra gli utenti.	41
Figura 43 Diagramma riassuntivo delle risposte al questionario iniziale riguardante le conoscenze pregresse sulle tecnologie utilizzate.	42
Figura 44 Grafico riassuntivo dei punteggi ottenuti durante la calibrazione di NextMind	42
Figura 45 Utente durante il test dinamico con distrattori usando HoloLens 2	44
Figura 46 Esempio di target distrattore	45
Figura 47 a) Test statico circolare senza distrattori b) Test statico circolare con distrattori c) Test statico croce senza distrattori d) Test statico croce con distrattori	45

Figura 48 Diagramma esemplificativo della struttura del test relativa alla prima colonna del Latin Square.	46
Figura 49 Tempo totale del test statico in relazione al gruppo	47
Figura 50 Errore di timeout nel test statico in relazione al gruppo	48
Figura 51 Tempo totale del test statico in assenza (NO) e in presenza di distrattori (YES)	49
Figura 52 Tempo totale del test statico in relazione al gruppo e alla presenza di distrattori	49
Figura 53 Errore di selezione non corretta in relazione al gruppo e distrattori	50
Figura 54 Tempo totale del test dinamico in relazione al gruppo	50
Figura 55 Errore di timeout nel test dinamico in relazione al gruppo	51
Figura 56 Tempo totale del test dinamico in assenza (NO) e in presenza di distrattori (YES)	51
Figura 57 Tempo totale del test dinamico in relazione al gruppo e alla presenza di distrattori	52
Figura 58 Errore di selezione non corretta in relazione al gruppo e alla presenza di distrattori	52
Figura 59 Tempo totale del test dinamico in relazione alla velocità dei target	53
Figura 60 Errore di timeout in relazione alla velocità dei target	53
Figura 61 Grafico riassuntivo delle preferenze degli utenti in relazione alla tipologia di test	54
Figura 62 Risposte medie alle domande del test statico in relazione al gruppo	54
Figura 63 Risposte medie alle domande del test dinamico in relazione al gruppo	55

Elenco delle tabelle

Tabella 1 Caratteristiche tecniche HoloLens 2	23
Tabella 2 Caratteristiche tecniche NextMind	24
Tabella 3 Tabella riassuntiva dei tempi di timeout per tipologia di test	44
Tabella 4 Latin Square utilizzato per i test	46

Acronimi

AR Augmented Reality

BCI Brain Computer Interface

BMI Brain Machine Interface

CR Corneal Reflection

EEG Elettroencefalografia

EMG Elettromiografia

EP Evoked Potentials

ERP Event Related Potential

FFT Fast Fourier Transform

fMRI Functional Magnetic Resonance Imaging

GUI Graphical User Interface

HCI Human-Computer Interaction

HMD Head Mounted Display

HMI Human Machine Interface

ITR Information Transfer Rate

LED Light Emission Diod

LIS Locked-In Syndrome

MEG Magnetoencefalografia

ML1 Magic Leap One

MR Mixed Reality

MRTK Mixed Reality Toolkit

PAR Projected Augmented Reality

PET Positron Emission Tomography

pBCI Passive Brain Computer Interface

rBCI Reactive Brain Computer Interface

SLA Sclerosi Laterale Amiotrofica

SSVEP Steady State Visually Evoked Potentials

UI User Interface

VR Virtual Reality

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni, le Brain Computer Interface (BCI) e la realtà aumentata (AR) hanno riscontrato una notevole attenzione, sia in ambito accademico che industriale, grazie alla loro capacità di semplificare la modalità di interazione degli utenti con i sistemi digitali. In particolare, le BCI rappresentano un avanzamento significativo nella tecnologia di interazione uomo-macchina, consentendo la comunicazione diretta tra il cervello umano e dispositivi esterni. Questi sistemi interpretano i segnali neuronali per controllare computer e altri dispositivi, offrendo potenziali applicazioni in ambito medico e nell'assistenza a persone con disabilità motorie. Le BCI stanno trasformando il modo in cui gli utenti interagiscono con la tecnologia, migliorando l'accessibilità e aprendo nuove possibilità nel campo della neurotecnologia. Parallelamente, la realtà aumentata integra elementi digitali nel mondo fisico, migliorando la percezione sensoriale attraverso dispositivi come smartphone e visori. Questa tecnologia sovrappone informazioni virtuali all'ambiente reale, creando esperienze immersive che trovano applicazione in diversi settori, dall'intrattenimento alla formazione professionale. La capacità dell'AR di fornire dati contestuali in tempo reale arricchisce l'interazione umana con il contesto circostante, trasformando radicalmente l'approccio ai sistemi informativi.

La realtà aumentata proiettata (PAR) si distingue per la sua capacità di sovrapporre informazioni digitali direttamente nell'ambiente fisico reale, migliorando l'esperienza dell'utente senza l'uso di visori o schermi. Allo stesso tempo, le tecnologie di eye-tracking e BCI rappresentano avanzate metodologie per il controllo e la selezione di target in ambienti virtuali e aumentati. La selezione di target si riferisce al processo di identificazione e scelta di un obiettivo specifico all'interno di un ambiente digitale o fisico. Il target può essere un oggetto, un elemento dell'interfaccia utente, un punto su uno schermo, o qualsiasi altro elemento con cui l'utente intenda interagire o manipolare.

Nel contesto del presente lavoro, il termine "eye-tracking" è utilizzato come sinonimo di "gaze-tracking". Entrambi i termini si riferiscono alla tecnologia e ai metodi per misurare e analizzare i movimenti oculari e la direzione dello sguardo degli utenti. L'eye-tracking consente di rilevare e monitorare dove un soggetto sta guardando e di misurare il tempo in cui lo sguardo si sofferma su un punto specifico nello spazio. Questa tecnologia è utilizzata in una vasta gamma di applicazioni che spaziano dalla ricerca in psicologia e medicina, alla pubblicità, fino al settore dei giochi e alle interfacce uomo-macchina (HMI). Il dispositivo utilizzato che sfrutta questa tecnologia, è l'HoloLens 2 di Microsoft, un visore di realtà aumentata che, oltre a proiettare elementi digitali nell'ambiente fisico, è dotato di sensori avanzati per l'eye-tracking, permettendo delle interazioni naturali e intuitive con gli oggetti virtuali. L'altra tecnologia impiegata è l'interfaccia neurale NextMind, una BCI non invasiva basata sugli Steady State Visually Evoked Potentials (SSVEP). Utilizzando la tecnologia EEG, NextMind è progettata per rilevare l'attività cerebrale indotta da stimolazioni visive specifiche, offrendo un metodo preciso e non invasivo per interpretare le risposte neurali correlate alla percezione visiva. Le tecnologie BCI e eye-tracking presentano un potenziale significativo. Tuttavia gli studi su come sfruttare al meglio queste due tecnologie sono ancora poco esplorati visto il loro recente sviluppo e commercializzazione.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è confrontare un'interfaccia basata su eye-tracking con una BCI per la selezione di target, utilizzando la PAR per la visualizzazione dei target da selezionare. Per condurre un confronto tra le due interfacce, vengono analizzati due contesti distinti: statico e dinamico, con l'obiettivo finale di comprendere l'efficacia delle due tecnologie in condizioni differenti. Nel contesto statico, l'ambiente di interazione rimane stabile e privo di movimenti. Questo scenario è progettato per valutare le capacità delle interfacce nel gestire situazioni dove la visualizzazione e la selezione di obiettivi virtuali avvengono in condizioni statiche e controllate. L'obiettivo è determinare quale delle due interfacce dimostri una maggiore precisione e affidabilità nelle interazioni in condizioni ideali.

Nel contesto dinamico, l'ambiente presenta movimenti e cambiamenti rapidi, richiedendo alle interfacce di adattarsi continuamente per mantenere un'interazione efficace. Questo scenario simula situazioni reali dove l'utente potrebbe trovarsi in ambienti con movimenti o con cambiamenti rapidi delle condizioni visive. Qui, l'analisi si concentra su quale delle due tecnologie sia più adatta a gestire l'interazione fluida e reattiva.

Ciascuno di questi contesti è stato analizzato sotto due diverse condizioni sperimentali: una in assenza di elementi distrattori, per valutare le prestazioni nelle condizioni ottimali, e l'altra con l'introduzione di distrattori. Gli elementi distrattori rappresentano componenti aggiuntivi nel campo visivo dell'utente progettati per interferire con la selezione accurata di obiettivi o informazioni. L'introduzione di distrattori permette di esaminare come le interfacce rispondano a condizioni più complesse e realistiche, dove l'attenzione dell'utente su un obiettivo primario può essere deviata da obiettivi secondari. Questo aspetto è cruciale per comprendere l'efficacia delle interfacce nella gestione di ambienti con stimoli competitivi o potenziali disturbi visivi.

Il confronto si articola attorno a tre principali domande:

- **R1:** Qual è l'efficacia delle due interfacce in una situazione statica?
- **R2:** In una situazione dinamica, caratterizzata da movimenti rapidi e cambiamenti nell'ambiente, quale delle due interfacce dimostra maggiore capacità di adattamento e precisione?
- **R3:** Qual è l'impatto degli elementi distrattori sulla selezione del target? Gli elementi distrattori influenzano significativamente l'efficacia delle interfacce nel contesto dinamico e statico?

Per rispondere a queste domande, sono stati esaminati molteplici parametri chiave:

- Accuratezza: il numero di errori effettuati nella selezione dei target.
- Velocità di selezione: il tempo impiegato per selezionare un target.
- Facilità d'uso: valutazione della percezione di confort e semplicità percepiti dagli utenti durante l'interazione con l'interfaccia.

Questi parametri sono cruciali per valutare le prestazioni delle tecnologie BCI e eye-tracking in contesti statici e dinamici, nonché sotto l'influenza di elementi distrattori, fornendo una panoramica completa delle loro capacità e limitazioni applicative.

L'analisi comparativa si propone di fornire informazioni cruciali per lo sviluppo di future interfacce utente più efficienti e intuitive. Infatti, queste tecnologie possono essere integrate in vari settori, migliorando l'interazione uomo-macchina. I risultati dello studio possono indirizzare la progettazione di dispositivi più avanzati, che sfruttano al meglio le potenzialità di eye-tracking e BCI. Possono inoltre offrire nuove opportunità di interazione per persone con disabilità motorie o comunicative, permettendo loro di controllare dispositivi digitali attraverso l'attività cerebrale. In ambito industriale, l'uso di eye-tracking e BCI può migliorare l'efficienza e la sicurezza dei processi produttivi, permettendo operazioni più rapide e precise senza l'uso delle mani.

1.1 Organizzazione dei capitoli

Il capitolo 2 esaminerà lo stato dell'arte attuale della tecnologia della realtà aumentata proiettata e, successivamente, saranno analizzati progetti significativi in cui sono stati utilizzati i dispositivi NextMind e HoloLens 2.

Il capitolo 3 descriverà il concetto di selezione di target, analizzando i vari dispositivi di input utilizzati per la selezione di target in diversi contesti, con particolare attenzione alle loro applicazioni e prestazioni.

Il capitolo 4 presenterà dettagliatamente le tecnologie sia hardware che software utilizzate nello sviluppo del progetto. Si parlerà dei componenti principali dei dispositivi NextMind e HoloLens 2 e degli strumenti di sviluppo impiegati per integrare e ottimizzare le funzionalità di eye-tracking e BCI nelle applicazioni di realtà aumentata proiettata.

Il capitolo 5 spiegherà come è avvenuta la progettazione e lo sviluppo delle due applicazioni. Si discuterà il funzionamento dettagliato delle applicazioni, evidenziando come gli utenti interagiscono e come avviene la selezione dei target.

Il capitolo 6 illustrerà in dettaglio i test condotti dagli utenti per valutare le prestazioni e l'efficacia delle due tecnologie di selezione di target. I risultati ottenuti dai test saranno analizzati e riassunti per fornire una valutazione globale delle prestazioni delle tecnologie in esame.

Il capitolo 7 sintetizzerà le conclusioni principali dello studio basandosi sui risultati presentati nei capitoli precedenti. Saranno discussi i vantaggi, le limitazioni delle tecnologie e proposti anche possibili sviluppi futuri per il miglioramento delle applicazioni.

Capitolo 2

Stato dell'Arte

Questo capitolo esaminerà lo stato dell'arte attuale delle tecnologie utilizzate, analizzando in dettaglio progetti significativi che le hanno implementate.

2.1 Realtà Aumentata e Realtà Aumentata Proiettata

La realtà aumentata (AR) è una tecnologia che arricchisce l'ambiente fisico con informazioni digitali sovrapposte, come immagini, suoni, video o altri dati sensoriali. Il principio alla base della AR è quello di sovrapporre grafica generata tramite un computer sul mondo reale, in modo tale da creare un ambiente spazialmente integrato e continuo migliorando l'esperienza percettiva dell'utente. Le tecnologie di AR si sono principalmente focalizzate sulle tecnologie di output, come head-mounted display (HMD), dispositivi portatili o visualizzazioni proiettate nello spazio [1]. In base alle tecnologie di output utilizzate, sono stati sviluppati tre diversi paradigmi: hand-held, wearable e projected [2].

- **Il paradigma hand-held** utilizza dispositivi portatili come smartphone e tablet. Questi dispositivi catturano l'ambiente reale attraverso la fotocamera e sovrappongono elementi virtuali sullo schermo, permettendo all'utente di interagire con essi. Questo approccio è molto diffuso grazie alla disponibilità di dispositivi mobili e alla facilità d'uso.
- **Il paradigma wearable**, invece, sfrutta dispositivi indossabili come occhiali smart o visori AR. Questi dispositivi proiettano informazioni direttamente nel campo visivo dell'utente, consentendo un'interazione più immersiva e naturale. I dispositivi indossabili liberano le mani dell'utente, rendendo questa tecnologia particolarmente utile in ambiti come la manutenzione industriale e la formazione medica, dove è necessaria l'attenzione visiva costante e la possibilità di manipolare oggetti fisici.
- **Il paradigma projected** si basa sull'uso di proiettori per sovrapporre immagini o informazioni direttamente sugli oggetti fisici o sull'ambiente circostante. Questo approccio non richiede dispositivi indossabili o portatili, poiché l'utente interagisce con l'ambiente aumentato attraverso le proiezioni. La realtà aumentata proiettata è ideale per ambienti pubblici come musei, mostre e spazi commerciali, dove può fornire informazioni aggiuntive e migliorare l'interazione con i visitatori.

L'AR si distingue dalla realtà virtuale (VR) e dalla realtà mista (MR) per il modo in cui interagisce con il mondo reale [3]. La AR integra elementi virtuali nell'ambiente fisico, permettendo all'utente di interagire con entrambi contemporaneamente. In contrasto, la VR crea un ambiente completamente digitale che sostituisce il mondo reale, isolando l'utente dall'ambiente fisico circostante. La realtà mista, invece, combina aspetti di AR e VR, permettendo agli oggetti virtuali di interagire con l'ambiente reale in tempo reale, offrendo un'esperienza di interazione più integrata [4].

Il continuum AR-VR, introdotto da Paul Milgram e Fumio Kishino [5], rappresenta uno spettro che va dalla realtà completamente reale alla realtà completamente virtuale. Questo continuum è uno strumento concettuale utile per comprendere e categorizzare le diverse tecnologie che mescolano elementi del mondo reale e del mondo virtuale. Il continuum AR-VR descritto in Figura 1, è rappresentato graficamente come una linea retta, dove un'estremità rappresenta la realtà fisica pura e l'altra estremità rappresenta una realtà completamente virtuale. Tra questi due estremi, esistono vari punti intermedi che rappresentano diverse combinazioni di elementi reali e virtuali. All'inizio del continuum si trova la realtà reale, l'ambiente fisico senza aggiunte virtuali. Successivamente, la realtà aumentata introduce elementi virtuali sovrapposti alla realtà fisica. La realtà mista rappresenta una combinazione di elementi reali e virtuali che interagiscono tra loro. Infine, la VR rappresenta un ambiente completamente digitale che sostituisce il mondo reale, offrendo un'esperienza immersiva totale.

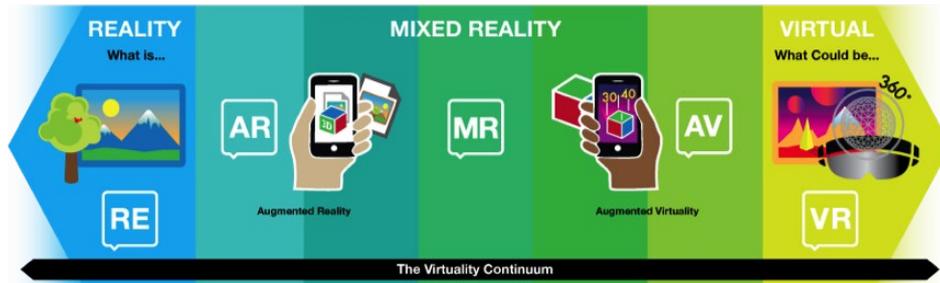


Figura 1 AR-VR Continuum [67]

La PAR rappresenta un approccio innovativo nell'ambito dell'AR, poiché elimina la necessità di dispositivi portatili o indossabili. Utilizzando proiettori, questa tecnologia sovrappone immagini o informazioni direttamente sugli oggetti fisici o sull'ambiente circostante. Questo metodo offre un'interazione più naturale e intuitiva, poiché gli utenti possono interagire con l'ambiente aumentato senza la necessità di indossare o tenere dispositivi. Uno dei principali vantaggi della realtà aumentata proiettata è l'accessibilità, poiché riduce le barriere tecnologiche permettendo a un pubblico più ampio di sperimentare la realtà aumentata senza la necessità di dispositivi personali costosi. Inoltre, la versatilità di questa tecnologia consente la sua applicazione in vari settori. Nei musei e nelle mostre [6], ad esempio, le proiezioni interattive arricchiscono le esposizioni con informazioni supplementari e visualizzazioni dinamiche. Nel design e nell'architettura, la realtà aumentata proiettata permette la proiezione di modelli 3D su superfici fisiche per revisioni di progetto e presentazioni ai clienti. Nella formazione e istruzione, le guide visive proiettate forniscono istruzioni dettagliate per processi di assemblaggio o manutenzione direttamente sui componenti fisici.

L'elemento principale della PAR è il proiettore utilizzato per visualizzare le immagini, i video o contenuti interattivi direttamente su superfici fisiche. I proiettori possono essere montati in base alle necessità su supporti mobili o fissi. Nel corso degli ultimi anni, PAR ha trovato impiego in numerosi settori diversi come l'educazione, la pubblicità e l'intrattenimento. Nell'ambito educativo, PAR viene utilizzata per creare ambienti di apprendimento interattivi dove gli studenti possono interagire direttamente con contenuti proiettati su superfici [7]. Rispetto ad altre forme di realtà aumentata, PAR offre la possibilità di proiettare contenuti su superfici ampie e diverse, rendendola adatta per numerosi ambienti in cui è necessario interagire con oggetti fisici. Alcune sfide associate a PAR includono la necessità di condizioni di illuminazione adeguate per una buona visibilità dei contenuti proiettati e la gestione degli angoli di proiezione per garantire una visualizzazione ottimale [1].

Un primo esempio di utilizzo della PAR è rappresentato da uno studio nel quale è stato utilizzato un sistema che combina una telecamera di profondità, un proiettore stereoscopico e uno schermo curvo per creare un'esperienza interattiva che integra mondi reali e virtuali su un tavolo [8]. Alla base dello studio vi è l'esigenza di esplorare e dimostrare la possibilità di creare un'esperienza di AR convincente senza la necessità di utilizzare dispositivi aggiuntivi come HMD, tracker, guanti o attrezzature speciali. Il sistema MirageTable evidenziato in Figura 2 consente agli utenti di interagire con oggetti digitali 3D accanto a oggetti fisici reali in modo fisicamente realistico. Utilizzando esclusivamente le informazioni di profondità provenienti da telecamere dedicate, il sistema consente la cattura 3D istantanea di oggetti fisici e utenti, il rendering stereoscopico di questi oggetti su superfici reali non piatte e il tracciamento della testa dell'utente.

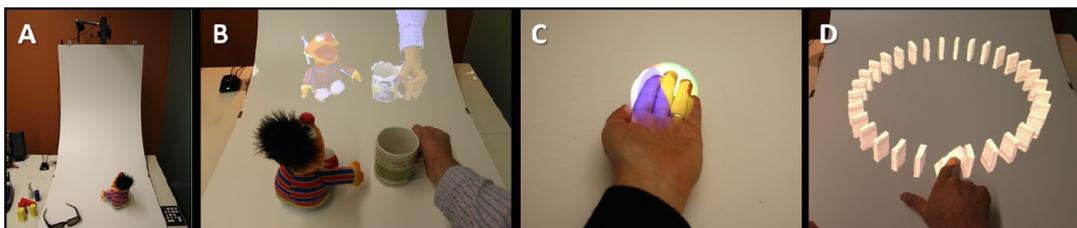


Figura 2 Utilizzo del sistema MirageTable

Gli esperimenti condotti hanno dimostrato che gli utenti percepiscono correttamente gli oggetti proiettati, anche su sfondi di colore e geometrie variabili. Questa tecnologia non solo sfuma la linea tra mondo fisico e virtuale, ma dimostra anche come tali interazioni possano essere integrate per creare esperienze AR più immersive e naturali, eliminando la necessità di strumenti indossabili.

Il progetto seguente descritto in Figura 3, invece, è un sistema di telepresenza che frutta la PAR per consentire interazioni umane in scala naturale tra due partecipanti da remoto, senza la necessità di dover indossare alcuna attrezzatura. L'obiettivo di Room2Room è quello di far vivere agli utenti l'esperienza di una conversazione faccia a faccia il più naturale possibile, catturando in 3D l'utente locale tramite telecamere a colori e profondità, e proiettando la loro copia virtuale a grandezza naturale nello spazio remoto [9]. Questo crea l'illusione della presenza fisica della persona remota nello spazio locale, oltre a favorire una comprensione condivisa di segnali verbali e non verbali come lo sguardo e i gesti. Complessivamente, l'uso della PAR in Room2Room ha facilitato un'integrazione fluida degli spazi personali, delle attività e dei punti di riferimento, migliorando significativamente l'esperienza di telepresenza e aprendo nuove possibilità per interazioni più immersive e realistiche tra partecipanti in ambienti fisici separati.

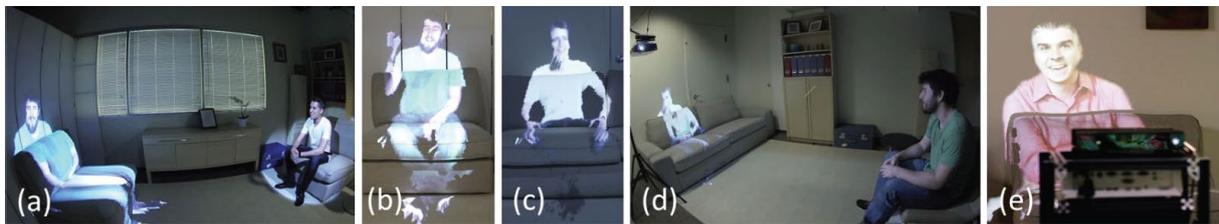


Figura 3 Utilizzo del sistema Room2Room

Di notevole rilievo è un progetto del Politecnico di Torino che si focalizza sull'implementazione di un sistema innovativo per il controllo di un braccio robotico tramite una BCI utilizzando il dispositivo NextMind [10]. Una delle caratteristiche distintive e innovative del progetto è l'utilizzo della PAR per visualizzare l'interfaccia utente direttamente sull'area di lavoro del robot. Questo approccio permette agli utenti di posizionarsi dinanzi all'area di lavoro e interagire con essa in modo naturale e efficace tramite il NextMind. La proiezione dei NeuroTag facilita la selezione e il controllo preciso del braccio robotico, migliorando significativamente l'usabilità e l'efficienza del sistema. La Figura 4 mostra lo schema del sistema sviluppato.

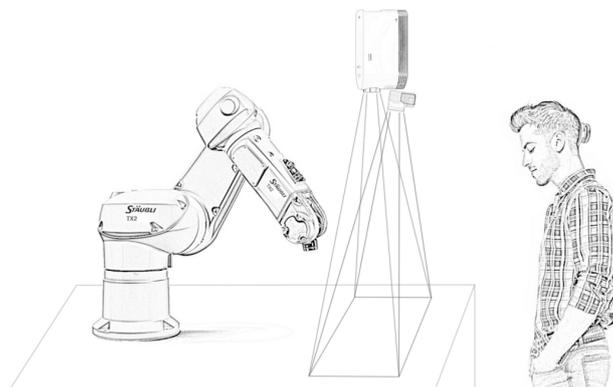


Figura 4 Schema del sistema Robot-BCI-Proiettore

L'importanza di questa tecnologia risiede nel rendere il sistema più accessibile e intuitivo per gli utenti, consentendo loro di operare senza la necessità di interfacce tradizionali come tastiere, mouse o comandi vocali. Questo non solo aumenta la precisione delle operazioni eseguite dal braccio robotico, ma apre anche la strada a nuove applicazioni nell'ambito della robotica di servizio e industriale, dove la manipolazione sicura e precisa degli oggetti è fondamentale.

2.2 BCI e EEG-SSVEP

Un'interfaccia cervello-computer (BCI) è un dispositivo che consente a una persona di controllare un dispositivo esterno meccanico o elettrico tramite il pensiero. Le BCI leggono i segnali neuronali del cervello e utilizzano algoritmi informatici per tradurli in azioni. Le operazioni base svolte da una BCI sono riassunte in Figura 5. La ricerca sulle BCI è iniziata negli anni '70 presso l'Università della California a Los Angeles, grazie a un finanziamento della National Science Foundation [11].

Le BCI traducono i segnali elettrici provenienti dall'attività cerebrale in output, che permettono agli utenti di comunicare senza il coinvolgimento dei nervi periferici e dei muscoli. Poiché non dipendono dal controllo neuromuscolare, le BCI offrono opzioni di comunicazione e controllo per persone con gravi disturbi neuromuscolari (come la sclerosi laterale amiotrofica, ictus del tronco cerebrale, paralisi cerebrale e lesioni del midollo spinale). Lo scopo principale della ricerca e dello sviluppo delle BCI è consentire a questi utenti di comunicare i propri desideri, utilizzare programmi di videoscrittura e altri software, e persino controllare un braccio robotico o una neuroprotesi. Si è ipotizzato che le BCI potrebbero essere utili anche per persone con minori o nessun deficit motorio [12].

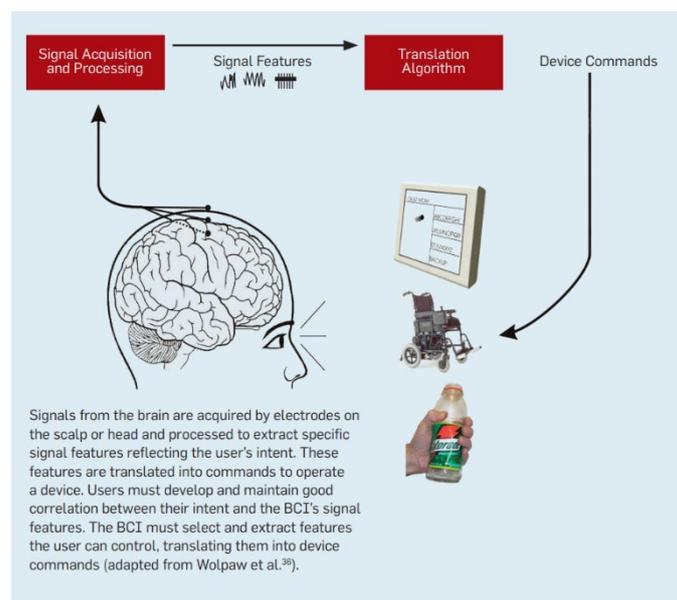


Figura 5 Operazioni base di un sistema BCI

I cambiamenti del potenziale elettrico nell'attività cerebrale dovuti a uno stimolo esterno sono noti come potenziali evocati (EP) e possono essere osservati nella corteccia sensoriale del cervello. I potenziali evocati visivi stazionari (SSVEP) sono componenti periodici della stessa frequenza di uno stimolo visivo che lampeggia continuamente (superiore a 4 Hz), e possono essere ottenuti dall'attività cerebrale nella corteccia visiva, quando una persona si concentra su quello stimolo. La risposta SSVEP può essere rilevata in modo abbastanza robusto, perché le sue caratteristiche variano rispetto all'attività cerebrale spontanea [13]. Alla base del funzionamento delle BCI vi è la rilevazione di segnali elettrici del cervello attraverso tecnologie come l'elettroencefalografia (EEG), che utilizza elettrodi posizionati sul cuoio capelluto per registrare i segnali l'attività elettrica cerebrale ed in particolare i segnali SSVEP. Questi segnali sono caratterizzati da una componente frequenziale precisa che può essere estratta e analizzata tramite algoritmi specializzati.

Gli algoritmi di analisi SSVEP seguono tipicamente quattro processi principali:

1. **Rilevazione dei Segnali EEG:** I segnali elettrici del cervello vengono captati dagli elettrodi EEG e digitalizzati per l'elaborazione successiva.
2. **Filtraggio e Amplificazione:** I segnali EEG grezzi contengono rumore e artefatti che devono essere rimossi. Vengono applicati filtri passa-banda per isolare le frequenze di interesse e amplificatori per migliorare il rapporto segnale-rumore.

3. **Analisi dei Segnali:** Attraverso tecniche di trasformata di Fourier (FFT), vengono estratte le componenti frequenziali rilevanti che corrispondono agli stimoli visivi.
4. **Traduzione dei Comandi:** Le frequenze rilevate vengono interpretate da algoritmi di machine learning o modelli predittivi, che trasformano queste informazioni in comandi eseguibili dai dispositivi collegati.

Le BCI possono essere classificate in base al grado di invasività e al tipo di interazione che permettono. Si possono distinguere 3 tipi principali di BCI:

- **BCI Invasive:** Queste interfacce richiedono l'impianto di elettrodi direttamente nel tessuto cerebrale. Offrono una risoluzione spaziale e temporale elevata ma comportano rischi chirurgici e complicazioni mediche, come infezioni, meningite e lesioni neuronali.
- **BCI Semi-Invasive:** Gli elettrodi vengono impiantati all'interno del cranio ma non penetrano il tessuto cerebrale. Riduce alcuni rischi rispetto alle BCI invasive, mantenendo una buona qualità del segnale.
- **BCI Non-Invasive:** Utilizzano elettrodi posizionati sul cuoio capelluto, come nel caso dell'EEG. Sono sicure e facili da applicare ma soffrono di una risoluzione spaziale inferiore e di una maggiore suscettibilità al rumore. Un esempio di BCI non-invasiva è mostrato nella Figura 6.

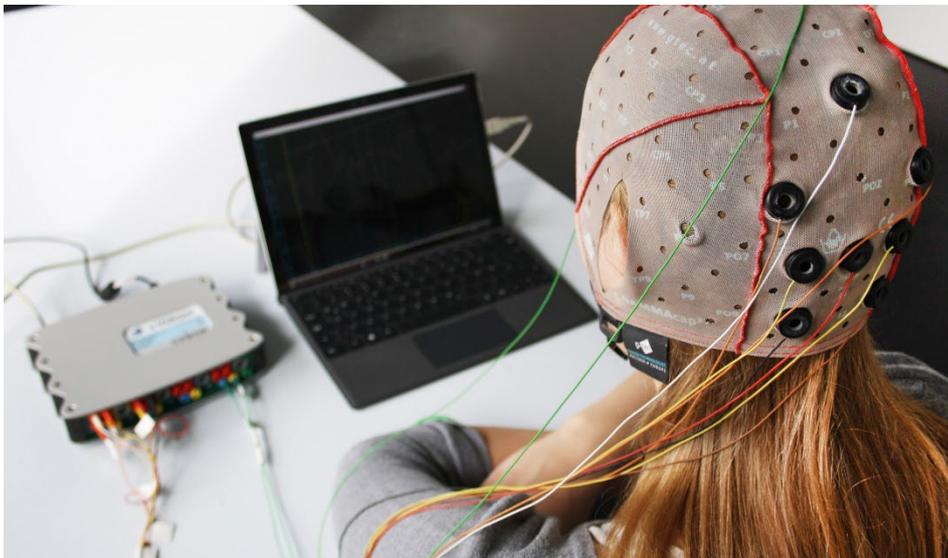


Figura 6 Esempio di BCI non invasiva [68]

Le BCI di tipo non-invasivo possono sfruttare diverse tecnologie di imaging cerebrale per riconoscere gli SSVEP.

- **L'Elettroencefalografia (EEG)** rappresenta il metodo più comune e accessibile per registrare l'attività elettrica cerebrale mediante elettrodi posizionati sul cuoio capelluto. L'analisi spettrale, come la trasformata di Fourier, viene utilizzata per identificare le componenti di frequenza associate agli SSVEP, consentendo la selezione e il controllo di dispositivi attraverso l'interfaccia BCI. Nonostante generi segnali di minore fedeltà rispetto alle tecniche invasive o parzialmente invasive, l'EEG ha attirato il maggior interesse, principalmente perché è di gran lunga l'approccio più user-friendly e utilizza strumentazione molto più semplice [11].
- **La Magnetoencefalografia (MEG)** misura i campi magnetici generati dalle correnti neurali nel cervello. È particolarmente sensibile alle attività corticali superficiali e offre una risoluzione temporale elevata simile all'EEG. Negli studi delle BCI, la MEG può essere impiegata per monitorare le risposte corticali agli stimoli visivi lampeggianti, contribuendo alla comprensione delle dinamiche neurali associate agli SSVEP e alla loro implementazione nelle interfacce BCI non invasive.

- **La Risonanza Magnetica Funzionale (fMRI)** misura i cambiamenti nel flusso sanguigno cerebrale come misura indiretta dell'attività neuronale. Anche se non è adatto per l'acquisizione in tempo reale necessaria per le BCI, l'fMRI è utile per identificare le regioni cerebrali coinvolte nel riconoscimento degli SSVEP e nelle risposte a stimoli visivi lampeggianti. Può fornire informazioni complementari sull'attivazione cerebrale correlata agli SSVEP, migliorando la comprensione delle basi neurali delle interfacce BCI. Tuttavia, il costo, la complessità e le dimensioni delle macchine fMRI limitano il loro utilizzo alla ricerca [11].
- **La Tomografia ad Emissione di Positroni (PET)** misura il flusso sanguigno e il metabolismo cerebrale attraverso l'uso di traccianti radioattivi o isotopi. Sebbene meno utilizzata rispetto all'EEG, MEG e fMRI nelle BCI, questo metodo può fornire informazioni sulla funzionalità cerebrale globale e regionale in risposta agli stimoli visivi, contribuendo alla comprensione delle risposte SSVEP in contesti specifici di ricerca o clinici.

La scelta del metodo non invasivo per il riconoscimento degli SSVEP nelle BCI dipende dalle esigenze specifiche di risoluzione spaziale, temporale e di accessibilità. Combinazioni di queste tecniche possono essere utilizzate per migliorare la robustezza e l'affidabilità delle interfacce BCI, facilitando nuove forme di interazione uomo-macchina basate sulla decodifica dell'attività cerebrale.

Le BCI possono anche essere classificate in base al tipo di interazione che facilitano:

1. **BCI Attive:** L'utente genera volontariamente segnali cerebrali per comunicare o controllare dispositivi. Ad esempio, immaginare il movimento di una mano per muovere un cursore su uno schermo.
2. **BCI Passive:** Monitorano passivamente lo stato cerebrale dell'utente senza richiedere sforzi consapevoli. Utilizzate spesso per valutare lo stato di vigilanza o stress.
3. **BCI Reattive:** L'utente reagisce a stimoli esterni predefiniti, come nel caso degli SSVEP, dove la risposta cerebrale a uno stimolo visivo viene utilizzata per controllare dispositivi.

EEG-SSVEP è diventato uno strumento prezioso per la misurazione della funzione cognitiva nelle applicazioni mediche e di ricerca [14]. Uno studio pubblicato nel 2015 si propone di permettere alle persone gravemente disabili, che non possono controllare comodamente una carrozzina elettrica, di navigare autonomamente utilizzando una BCI basata su SSVEP [13]. Il lavoro, schematizzato in Figura 7, combina un'interfaccia BCI con un sistema di navigazione autonomo per eseguire in sicurezza i comandi emessi. Nove soggetti, tra i 24 e i 26 anni, hanno partecipato allo studio. I soggetti sono stimolati con un segnale a quattro diverse frequenze (da 6 a 9 Hz per sinistra, destra, basso e alto), e sono invitati a concentrarsi sul segnale direttamente sullo schermo, immaginando il movimento della carrozzina in corrispondenza del segnale lampeggiante. I segnali EEG sono registrati continuamente tramite tre elettrodi.

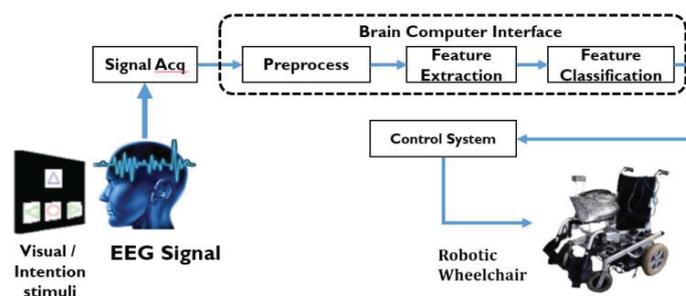


Figura 7 Schema di controllo della sedia a rotelle

Durante l'esperimento, ogni soggetto completa quattro sessioni per indicare quattro diverse direzioni di movimento. Lo studio dimostra l'applicabilità del sistema proposto tramite uno studio pilota nel mondo reale, in cui quattro soggetti non addestrati hanno navigato con successo una carrozzina automatizzata, richiedendo solo circa cinque minuti di preparazione. Il metodo proposto si dimostra efficace e potrebbe diventare uno strumento valido per altre applicazioni, consentendo alle persone con gravi disabilità motorie di utilizzare la tecnologia BCI per controllare dispositivi autonomi come una carrozzina elettrica.

Recentemente anche le potenziali applicazioni delle BCI nel campo delle smart homes e dell'internet browsing sono state ampiamente studiate. L'avvento di internet ha amplificato enormemente le potenzialità di comunicazione globale, ma la sfida principale è rendere internet accessibile per coloro la cui comunicazione è limitata dalla malattia. Il seguente studio ha realizzato un browser internet controllato tramite il P300 event-related potential (ERP), un tipo di risposta cerebrale a stimoli significativi, mira a facilitare l'accesso a internet per persone affette da malattie neurodegenerative come ad esempio SLA, LIS e altre condizioni simili. Il browser è stato verificato con successo su 10 partecipanti sani e tre individui in stadi avanzati di SLA. Un browser BCI che sfrutta il P300 ERP offre potenzialmente una navigazione internet più efficiente rispetto ai browser tradizionali. I risultati hanno mostrato un'accuratezza media sopra il 70% per i soggetti sani e quelli con SLA, sebbene i partecipanti con SLA abbiano mostrato un tasso di trasferimento di informazione (ITR) inferiore, probabilmente a causa della natura neurodegenerativa della malattia che può influenzare l'attenzione e i movimenti oculari [15].

Nel contesto delle smart home, le BCI offrono una soluzione innovativa per il controllo di dispositivi domestici, permettendo agli utenti di interagire con l'ambiente circostante in modo intuitivo e senza sforzo fisico. Un esempio di impiego di una BCI nel campo delle smart home è rappresentato da uno studio [16] che introduce un sistema BCI ibrido che combina due approcci distinti: il P300 e il SSVEP. L'obiettivo principale è sviluppare un sistema BCI per il controllo di un ambiente smart home virtuale, migliorando l'affidabilità e l'accuratezza delle interfacce cervello-computer per il controllo di vari dispositivi domestici.

Il sistema P300 è stato analizzato dimostrando un'elevata accuratezza e libertà di controllo. Durante gli esperimenti online, sono stati utilizzati quattro diversi comandi di controllo per gestire dispositivi come lampade, webcam, telefoni di sorveglianza e tende intelligenti.

La combinazione del P300 e del SSVEP ha prodotto risultati molto promettenti, con tutti i soggetti che hanno ottenuto un alto grado di affidabilità e accuratezza nel controllo degli ambienti smart home. Il sistema ibrido proposto offre un compromesso efficace tra la necessità di comandi discreti e continui, migliorando l'esperienza utente complessiva. L'integrazione di sistemi BCI per il controllo delle smart home può migliorare significativamente la qualità della vita delle persone con gravi disabilità, offrendo al contempo soluzioni praticabili e affidabili anche per utenti con esigenze diverse [17].

Come citato in precedenza, un ulteriore possibile utilizzo delle BCI è il controllo di un braccio robotico. Uno studio che si concentra sull'utilizzo di una BCI per il controllo di un braccio robotico utilizza dei LED che lampeggiano a frequenze specifiche come stimoli, il sistema assegna diversi comandi a ciascuna frequenza per consentire agli utenti di controllare il braccio robotico concentrando lo sguardo sul LED corrispondente. L'intento dell'utente è determinato analizzando i componenti spettrali della risposta SSVEP ottenuta e identificando il picco che corrisponde alla frequenza fondamentale o armonica dello stimolo desiderato [18].

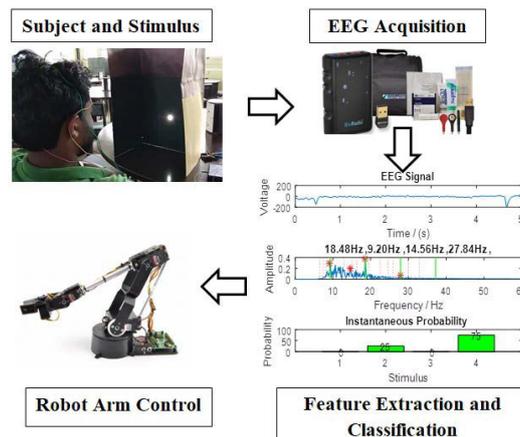


Figura 8 Schema controllo braccio robotico mediante BCI

Il sistema schematizzato in Figura 8, utilizza quattro LED con frequenze di lampeggio diverse per controllare rotazioni del polso e funzioni di presa di un braccio robotico, ripristinando quattro movimenti fondamentali della mano per individui disabili senza necessità di formazione specifica dell'utente. All'inizio del 2009, Honda ha sviluppato una nuova tecnica BMI non invasiva che combina EEG con spettroscopia nel vicino infrarosso (NIRS), superando le limitazioni dei sistemi EEG e fMRI. Questo sistema, sviluppato in collaborazione con

L'Advanced Telecommunications Research Institute International e la Shimadzu Corporation, include un casco dotato di sensori per misurare l'attività cerebrale e una tecnica di estrazione delle informazioni basata su computer. I segnali vengono elaborati per comandare wireless un robot umanoide Asimo, consentendogli di muoversi e agire in risposta ai pensieri dell'utente, con un'accuratezza superiore al 90% [11]. Questo rende il sistema ideale per applicazioni pratiche come la navigazione, l'interazione e altre attività controllate direttamente tramite il pensiero dell'utente. Tale innovazione rappresenta un significativo progresso nella tecnologia BMI, migliorando l'accessibilità e l'usabilità dei dispositivi robotici per le persone con disabilità motorie o altre limitazioni fisiche. In Figura 9 un esempio di utilizzo del robot Asimo.



Figura 9 Controllo del robot umanoide Asimo mediante BCI

Il NextMind è una BCI di tipo non invasivo che è in grado, utilizzando la tecnologia EEG-SSVEP, di rilevare l'attività cerebrale, permettendo una comunicazione diretta tra il cervello e i dispositivi esterni. Lanciato nel 2019, ha rappresentato una delle prime soluzioni orientate ai consumatori nel campo delle BCI non invasive. NextMind in particolare analizza l'attività neuronale nella corteccia visiva. A differenza del tracciamento degli occhi, che determina la posizione della pupilla, la tecnologia di NextMind trasforma le intenzioni in azioni analizzando i segnali cerebrali, riconoscendo i segnali visivi e decodificando il focus attivo dell'attenzione [19]. Qualsiasi oggetto che viene osservato provoca una certa reazione all'interno della corteccia visiva. Questa reazione neuronale è rappresentata nell'EEG come una singola oscillazione [20]. Il dispositivo NextMind si è rivelato molto affidabile presentando un basso tasso di errore quando viene utilizzato per la selezione di target tramite lo sguardo [21].

Un esempio recente di utilizzo del dispositivo NextMind è rappresentato da un progetto sviluppato presso la Scuola Superiore Nazionale di Aeronautica e Spazio di Tolosa, finalizzato a implementare una nuova tecnologia neuroadattiva che combina componenti reattivi e passivi della BCI per decodificare sia le interazioni dirette che implicite degli utenti [22]. Per questo scopo il NextMind svolge sia la funzione di BCI reattiva (rBCI) decodificando le intenzioni dirette, sia la funzione di BCI passiva (pBCI) stimando il livello di attenzione su incarichi di monitoraggio, adattando di conseguenza l'interazione. Come si vede in Figura 10, per il test del sistema è stato considerato uno scenario d'uso reale ovvero la cabina di pilotaggio di un simulatore di volo. Durante i test è stato chiesto ai partecipanti di eseguire checklist operative essenziali sfruttando la rBCI e contestualmente di monitorare un radar anti collisione utilizzando la pBCI, che comporta di osservare frequentemente il radar per determinare se si è in rotta di collisione con un altro aereo. Se l'attenzione del pilota è bassa e si è in una situazione di collisione con un altro aereo verrebbe automaticamente attivato il sistema anti collisione e mostrato un avviso arancione.



Figura 10 Interfaccia del sistema rBCI-pBCI

Questo tipo di approccio, non solo supporta i piloti nelle loro complesse attività multitasking, ma fornisce anche un sistema di sicurezza che si attiva solo quando necessario, rispettando la decisione e l'attenzione dei piloti. I risultati preliminari mostrano che i piloti hanno completato con successo le checklist con una sola attivazione erranea su 40 minuti di registrazione. Il tempo medio di reazione per interagire con gli elementi della checklist è stato di circa 2,78 s. Nel contesto del pBCI, i piloti hanno mancato 14 potenziali collisioni su 64, che sono state efficacemente compensate dal sistema pBCI.

Come citato in precedenza [10], in un progetto del Politecnico di Torino il NextMind è stato impiegato per il controllo di un braccio robotico destinato a effettuare operazioni di selezione e posizionamento. Il sistema, rappresentato in Figura 11, consente di rilevare degli oggetti posizionati all'interno dell'area di lavoro del robot, attorno ai quali vengono proiettati i NeuroTag da selezionare tramite il NextMind. In seguito alla selezione di un NeuroTag, il braccio robotico viene attivato e ha inizio il processo di raccolta dell'oggetto selezionato.

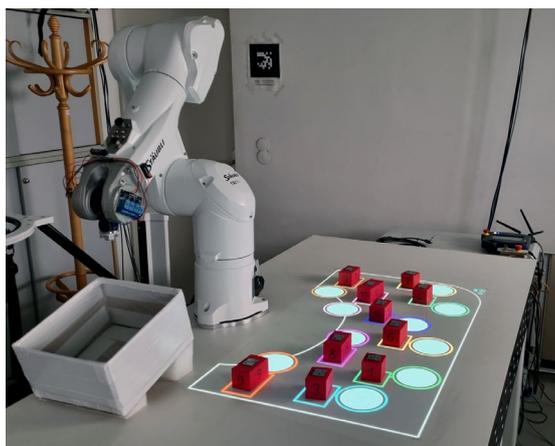


Figura 11 Sistema per il controllo del braccio robotico

Il design leggero ed ergonomico di NextMind consente di poterlo utilizzare anche in combinazione con altri dispositivi. In un altro studio condotto dal Politecnico di Torino [23] e raffigurato in Figura 12, è stato utilizzato NextMind in combinazione a HoloLens 2 per visualizzare tramite AR le diverse parti che compongono l'oggetto da assemblare, i NeuroTag usati da NextMind per abilitare la selezione e lo stato del robot. Questa configurazione consente all'utente di focalizzarsi esclusivamente sugli oggetti da assemblare, mantenendo sempre libere le mani. Un altro utilizzo innovativo riguarda lo sviluppo di un'applicazione per il controllo di una casa e di una sedia a rotelle intelligenti [24], evidenziando vantaggi come il costo contenuto, la connessione senza cavi, la portabilità, la facilità d'uso e l'elevata precisione. In ambito biomedico, NextMind è stato impiegato per la riabilitazione di pazienti attraverso giochi a scopo formativo [25], mentre in ambito artistico è stato utilizzato in Giappone per realizzare una performance [26]. Inoltre, è stato dimostrato che la comunicazione con agenti artificiali può essere raggiunta senza l'uso di tastiere o display, utilizzando esclusivamente NextMind [27], che è stato impiegato anche per controllare ambienti di realtà virtuale [28]. In conclusione, l'applicazione della tecnologia NextMind ha mostrato una notevole versatilità e un potenziale significativo in vari ambiti e questi esempi illustrano le potenzialità e l'adattabilità di NextMind in diversi contesti scientifici e tecnologici.

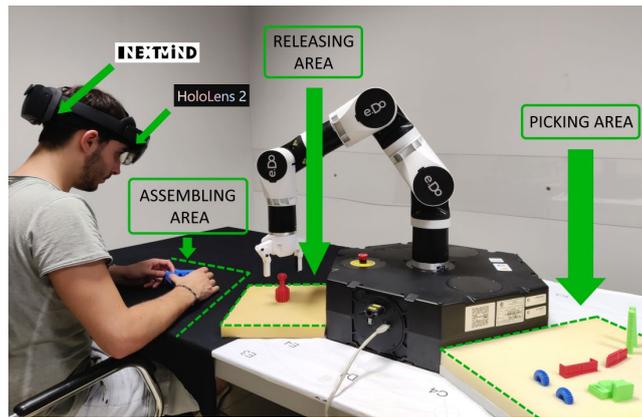


Figura 12 Utilizzo combinato di NextMind e HoloLens 2

2.3 Eye-tracking

L'eye-tracking è una tecnica consolidata e ampiamente utilizzata per studiare i processi cognitivi umana. È stato utilizzato per la prima volta all'inizio del XX secolo utilizzando specifiche lenti a contatto sulle quali era applicato un puntatore [29]. 30 anni dopo, questa tecnica è stata ottimizzata utilizzando fasci di luce e registrandone il riflesso su pellicola. Gli approcci moderni alla ricerca sui movimenti oculari si sono sviluppati durante gli anni 60 e da allora sono stati ulteriormente perfezionati. Gli strumenti per monitorare i movimenti oculari sono cambiati notevolmente negli ultimi anni. Oggi sono dominanti i sistemi basati su video che utilizzano tecniche di computer vision. Grazie allo sviluppo di fotocamere piccole e di alta qualità per dispositivi come gli smartphone, è ora possibile avere sistemi di tracciamento oculare leggeri e convenienti che possono persino essere inseriti in un visore VR o in occhiali portatili. Questi consentono un monitoraggio rapido e accurato dei movimenti oculari, fornendo una notevole quantità di dati [29].

L'interazione basata sugli occhi è considerata naturale e intuitiva perché minimizza lo sforzo fisico, permette agli utenti di spostare gli occhi verso il target di interesse in modo naturale e il movimento oculare è teoricamente più veloce di qualsiasi movimento degli arti [30]. Il dispositivo di misurazione più comunemente utilizzato per rilevare i movimenti oculari è noto come eye tracker. In generale, esistono due tipi di tecniche di monitoraggio dei movimenti oculari: quelle che misurano la posizione dell'occhio rispetto alla testa e quelle che misurano l'orientamento dell'occhio nello spazio [31]. Quest'ultima misurazione è tipicamente utilizzata quando l'obiettivo è l'identificazione degli elementi in una scena visiva, ad esempio nelle applicazioni interattive (grafiche). La tecnica più ampiamente applicata per la misurazione della posizione degli occhi è il video-based corneal reflection eye tracker [31]. Questo tipo di tracciamento, il cui funzionamento è descritto in Figura 13, si basa tipicamente sul monitoraggio della pupilla e di un riflesso corneale (CR) di una sorgente luminosa sulla prima superficie. La differenza di posizione tra queste due caratteristiche viene utilizzata per determinare l'orientamento dell'occhio rispetto alla testa dell'osservatore [32].

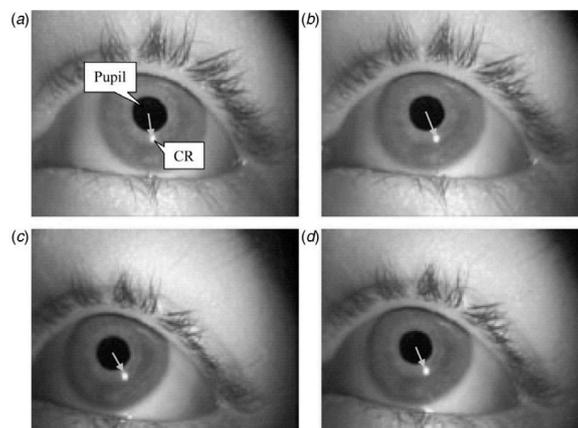


Figura 13 Funzionamento di un Video-Based CR eye tracker

Con i progressi tecnici e la crescente quantità di ricerca nel campo del tracciamento oculare, ora è diventata una tecnologia che può essere utilizzata fruttuosamente in un'ampia varietà di configurazioni per studiare i processi cognitivi umani [29]. Dalla ricerca scientifica alle applicazioni commerciali, eye-tracking rappresenta uno strumento importante in numerose discipline [33].

Uno dei principali vantaggi dell'impiego della tecnologia di eye-tracking risiede nella possibilità di effettuare interazioni senza l'uso delle mani. Un esempio di studio che esamina l'uso dell'eye-tracking come fonte primaria di input, eliminando così la necessità dell'interazione manuale, è il seguente [34]. L'obiettivo principale è quello di studiare nuovi metodi di input a mani libere a completamento dei controller manuali tradizionali. Per fare ciò è stata sviluppata una combinazione di tracciamento oculare e attivazione tramite elettromiografia (EMG). La gaming experience, illustrata in Figura 14, permette di puntare un'arma utilizzando gli occhi (selezione) e di sparare attraverso la contrazione dei muscoli del braccio (attivazione) per colpire diversi bersagli in un tempo prestabilito.



Figura 14 Utilizzo del sistema eye-tracking e EMG

L'eye tracking è uno strumento potente che può essere applicato a un'ampia varietà di domande di ricerca in molte discipline diverse. I progressi tecnologici hanno reso il tracciamento oculare più conveniente e accessibile a molti ricercatori [35]. Con l'ascesa di display AR indossabili come HoloLens 2, Magic Leap, Meta Quest Pro e il recentemente annunciato Apple Vision Pro, i tracciatori oculari sono stati integrati in varie piattaforme e casi d'uso. Tuttavia, l'uso ottimale di questa tecnologia su più piattaforme e la standardizzazione delle loro prestazioni rappresentano una sfida complessa [36].

Un primo esempio di utilizzo della tecnologia eye-tracking integrata con altri dispositivi è rappresentato dallo studio [37], che affronta la problematica del controllo di mani protesiche multi-presa proponendo un'interfaccia di commutazione delle prese basata sul tracciamento oculare integrata con bottoni virtuali in AR. Questo sistema permette di selezionare diverse prese semplicemente con lo sguardo, migliorando l'efficienza e l'intuitività del controllo delle protesi. Il sistema è stato implementato sul dispositivo AR HoloLens 2, che integra la tecnologia see-through e un eye tracker. Sono stati selezionati sei tipi di prese quotidiane (cilindrica, sferica, tripode, pizzico, gancio, laterale) come obiettivi. In Figura 15, viene mostrato il pannello operativo con sei GazeButtons che è stato progettato utilizzando Unity3D, permettendo la selezione delle prese attraverso

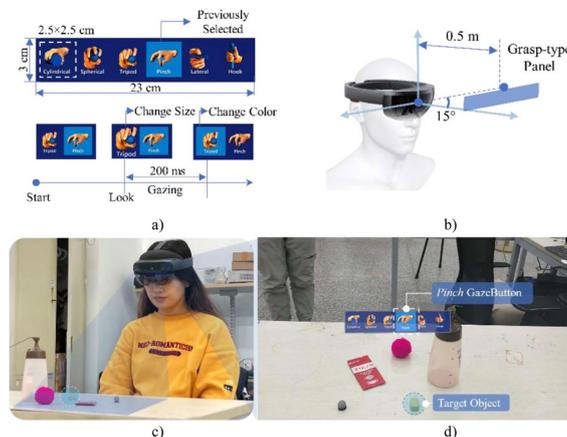


Figura 15 Sistema basato su eye-tracking in AR per il controllo di mani protesiche multi-presa

l'osservazione del punto specifico per almeno 200 ms. Ogni GazeButton è dotato di un testo e un'icona correlata alla presa per fornire un feedback intuitivo. Gli esperimenti condotti su otto soggetti sani hanno mostrato un tempo medio di commutazione di 0,84 s, con un tasso di successo del 99,0% e un'efficienza di apprendimento del 93,5%. Un soggetto con amputazione congenita ha mostrato risultati simili, con un tempo di commutazione di 0,78 s e un tasso di successo del 100%. Il sistema ha ottenuto le migliori prestazioni rispetto ad altri tre metodi tradizionali, dimostrando un'adattabilità superiore a diversi utenti con vari livelli di amputazione.

Un ulteriore caso studio è rappresentato da un utilizzo dell'eye-tracking in simulazioni mediche [38]. L'uso della realtà aumentata (AR) come strumento didattico clinico è stato ampiamente studiato [39], ma le capacità di tracciamento oculare integrate in un simulatore medico AR sono state poco esplorate. Il simulatore Chariot Augmented Reality Medical (CHARM) integra elementi di lavoro di squadra e comunicazioni in tempo reale in un simulatore medico portatile. Questo progetto aveva lo scopo di migliorare le capacità di tracciamento oculare del simulatore CHARM sul Magic Leap One (ML1). Adulti di età superiore ai 18 anni sono stati reclutati e hanno utilizzato un visore ML1 per proiettare un ologramma di un paziente, un letto e un monitor, come illustrato in Figura 16. Agli utenti è stato indicato tramite registrazione audio di fissare lo sguardo su specifici punti nella simulazione. Lo studio ha incluso 13 partecipanti, con i primi 10 che hanno mostrato una precisione inferiore all'80%. Dopo regolazioni dell'algoritmo, i tassi di cattura per gli ultimi tre partecipanti sono stati 80%, 80% e 80.1%, rispettivamente. Questo progetto suggerisce che la tecnologia di tracciamento oculare può essere utilizzata in modo affidabile con il ML1 e il software del simulatore CHARM.



Figura 16 Elementi proiettati su Magic Leap One durante il test

Capitolo 3

Selezione di target

3.1 Introduzione

La selezione di target, che implica l'identificazione di un oggetto specifico tra tutti gli oggetti disponibili [30], è sempre stata una delle discussioni importanti nel campo Human-Computer Interaction (HCI) [40], [41]. Le prime ricerche sulla selezione di target si sono concentrate principalmente su ambienti 2D [42], analizzando le modalità di selezione dei target su schermi tradizionali utilizzando dispositivi come il mouse [43] o la voce [44]. La legge di Fitts [45] è stata ampiamente utilizzata come modello per valutare le prestazioni di selezione del target in questi contesti. Formulata da Paul Fitts nel 1954, è un principio fondamentale dell'interazione uomo-computer e della psicomotricità, utilizzato per descrivere il tempo necessario a una persona per muovere un puntatore verso un obiettivo o target. La legge è espressa matematicamente come illustrato in Figura 17.

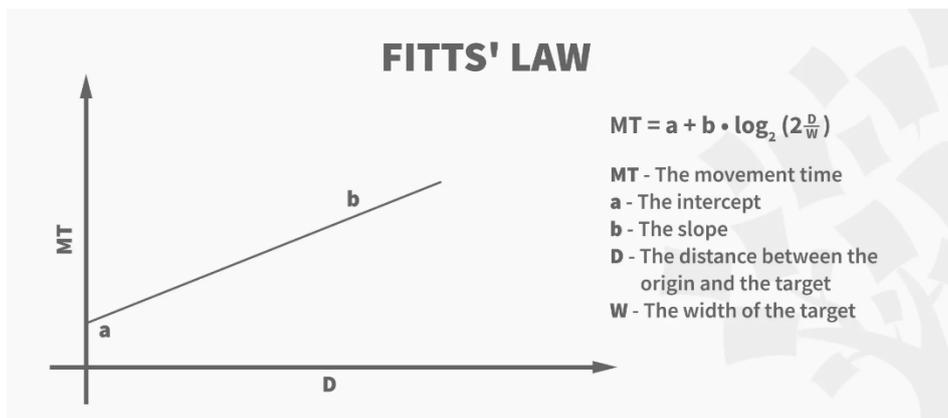


Figura 17 Legge di Fitts [69]

Dove:

- T è il tempo medio per compiere il movimento verso il target.
- a e b sono costanti che dipendono dalle caratteristiche dell'operatore e del dispositivo di puntamento.
- D è la distanza dal punto iniziale al centro del target.
- W è la larghezza del target misurata lungo la direzione del movimento.

In sintesi, la legge di Fitts fornisce una base teorica per prevedere e migliorare l'efficienza dei movimenti umani in attività che richiedono la selezione di target, aiutando a creare interfacce e strumenti che siano più intuitivi e facili da usare.

3.2 Selezione di target tramite mouse

Il metodo di selezione tramite mouse è stato uno dei primi e più diffusi meccanismi di interazione uomo-computer. Il mouse è un dispositivo di input esterno per il computer che serve a indicare la posizione delle coordinate verticali e orizzontali sul sistema di visualizzazione del computer. È uno dei dispositivi di input più ampiamente utilizzati, ed è cruciale per la selezione di elementi presenti in un'interfaccia grafica utente (GUI) [44]. I movimenti per selezionare un target eseguiti con un mouse per computer sono composti da due fasi distinte: (1) una fase di movimento e (2) una fase di attesa, definita come l'intervallo tra la terminazione del movimento e la selezione del target (tramite pressione o rilascio del pulsante). È stato dimostrato che fino al 50% del tempo di acquisizione del target può essere trascorso nella fase di attesa [46]. In questo stesso studio, sono stati confrontati due metodi per la selezione del target: (1) un metodo standard basato sul puntare e cliccare, in cui i target venivano selezionati premendo il pulsante del mouse, e (2) il metodo mouse-over, in cui i target venivano selezionati quando il cursore e il target erano sovrapposti per un periodo di tempo prestabilito. L'ipotesi è che il tempo necessario per completare una selezione può essere significativamente ridotto eliminando la necessità che l'utente preme o rilasci il pulsante. I risultati hanno mostrato che il metodo di selezione tramite mouse-over è significativamente più rapido del metodo di puntare e cliccare, con una riduzione media del tempo di selezione di 347 ms. Target più piccoli hanno comportato tempi di acquisizione più lunghi. Nonostante i vantaggi del metodo mouse-over, bisogna considerare che potrebbe non essere adatto per tutte le situazioni, come la selezione di elementi da menu, ma è efficace in contesti dove l'utente ha già deciso l'elemento da selezionare.

3.3 Selezione di target tramite voce

La selezione basata sulla voce rappresenta una promettente alternativa ai dispositivi di input convenzionali per computer, come tastiere e mouse. Per le persone con mobilità ridotta che non possono utilizzare i tradizionali dispositivi di input per computer, una soluzione interattiva basata sulla voce è altamente desiderabile [44]. Per controllare efficacemente le applicazioni che utilizzano interfacce grafiche utente, gli utenti devono essere in grado di completare compiti che sono tipicamente eseguiti utilizzando una tastiera o un mouse. Il riconoscimento vocale per la selezione di target utilizza algoritmi avanzati per interpretare e analizzare i comandi vocali dell'utente. Questi algoritmi identificano parole chiave o comandi specifici associati ai target desiderati nell'interfaccia utente. Una volta riconosciuto il comando vocale, il sistema esegue l'azione corrispondente, consentendo all'utente di selezionare il target desiderato senza l'uso delle tradizionali interfacce manuali [47]. Sebbene i sistemi di riconoscimento vocale all'avanguardia supportino sia l'inserimento di dati sia il controllo del cursore, le interazioni risultanti sono spesso più lente di quelle possibili con una tastiera e un mouse [48]. Un esempio di applicazione della selezione basata sulla voce è fornito dallo studio [44], che si propone di esplorare e valutare l'efficacia di due nuove tecniche di selezione basate sulla voce per interfacce utente vocali: la selezione per regione, riassunta in Figura 18, e la ricerca del target. L'obiettivo principale è migliorare l'efficienza della selezione del target per utenti con mobilità ridotta, confrontando queste nuove

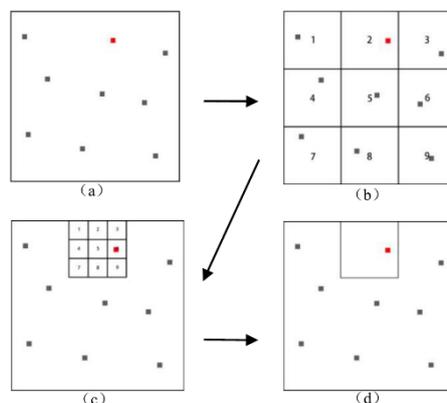


Figura 18 Esempio di selezione vocale usando il metodo selezione per regione

tecniche con la Selezione di Base in termini di dimensione e densità dei target. Le tecniche proposte, hanno mostrato un miglioramento delle prestazioni rispetto alla Selezione di Base, specialmente per target di piccole dimensioni. La Ricerca del Target ha dimostrato di essere significativamente più veloce della Selezione di Base, con un miglioramento del 76.4% per target di 10 pixel. Sotto diverse densità di target, la Ricerca del Target ha superato la Selezione di Base, mentre la Selezione per Regione non ha mostrato differenze significative rispetto alla Selezione di Base in condizioni di alta densità. Tuttavia, con bassa densità di target, la Selezione per Regione è risultata la più veloce.

3.4 Selezione di target tramite BCI

Anche le BCI emergono come una promettente modalità di input, offrendo nuove possibilità per la selezione di target. Un vantaggio cruciale delle BCI nella selezione del target risiede nella loro capacità di offrire un'interazione hands-free, riducendo la dipendenza dall'input fisico e migliorando l'accessibilità. La selezione del target basata su BCI può essere particolarmente utile in ambienti dove l'uso delle mani è limitato o impraticabile. Nonostante le potenzialità, l'implementazione efficace delle BCI presenta ancora sfide significative. Le problematiche principali includono la latenza nei tempi di risposta e la variabilità individuale nella generazione dei segnali neurali. Nell'esempio citato in precedenza [10], la BCI NextMind è stata utilizzata efficacemente per la selezione di target con l'obiettivo di controllare un braccio robotico, ottenendo prestazioni e risultati promettenti. Nel seguente studio, il NextMind Tuttavia, nonostante le BCI siano affidabili e precise nella selezione di target, presentano problemi di usabilità e richiedono un carico di lavoro che le rende tollerabili solo per un periodo limitato di tempo. Questo limita la loro adozione per sessioni prolungate in contesti lavorativi o ludici, rendendole complicate da indossare e utilizzare per molte ore al giorno.

3.5 Selezione di target tramite dispositivi HMD

Con l'avvento e la diffusione dei display tridimensionali (3D) e dei dispositivi di VR e AR, la ricerca si è estesa alla selezione di target in ambienti immersivi. Dispositivi HMD come l'HTC Vive Pro Eye e l'HoloLens 2 hanno introdotto nuove modalità di input, migliorando significativamente l'accuratezza e l'intuitività delle interazioni. I ricercatori hanno iniziato a considerare la selezione di target sfruttando le modalità di input innovative degli HMD, come la testa, la mano e il controller [30].

Negli HMD, il feedback visivo, aptico e audio viene spesso utilizzato insieme a tecniche di selezione per assistere gli utenti nei loro compiti di selezione [49]. Il feedback visivo comprende due forme principali: l'evidenziazione, che mette in risalto l'oggetto o il suo riquadro di delimitazione, e l'ombreggiatura, che proietta sia l'oggetto da selezionare che il cursore su un piano. Il feedback aptico, come vibrazioni e urti, aiuta a migliorare l'accuratezza della selezione e a ridurre gli errori, sebbene in ambienti affollati possa risultare controproducente guidando l'utente verso oggetti sbagliati. Il feedback audio può migliorare il tempo di reazione notificando la selezione con suoni brevi, ma in ambienti densi può diventare fastidioso e impraticabile. Questi feedback migliorano l'esperienza utente, ma riguardo alle prestazioni non si può dire molto in quanto la ricerca sull'effetto dei vari tipi di feedback è ancora limitata [49].

Recentemente, la tecnologia di eye-tracking è emersa come una promettente modalità di interazione nei dispositivi HMD. Grazie alla sua capacità di ridurre lo sforzo fisico e alla rapidità dei movimenti oculari rispetto ai movimenti degli arti, l'eye-tracking è considerato una soluzione naturale e intuitiva per la selezione del target, tuttavia, a causa del tremolio involontario degli occhi e delle limitazioni dei dispositivi di eye-tracking, la selezione basata sugli occhi spesso presenta scarse prestazioni in termini di accuratezza e stabilità rispetto ad altre modalità di input, specialmente per i target di piccole dimensioni. [30].

Numerosi studi hanno confrontato le prestazioni delle diverse modalità di input. In merito alle prestazioni dell'eye-tracking sono stati effettuati diversi studi confrontando la selezione basata sullo sguardo con la più convenzionale ed efficace selezione basata sulla mano. Già nel 2000, Tanriverdi e Jacob hanno scoperto che le interazioni basate sullo sguardo sono più rapide ed efficienti rispetto quelle basate sulle mani, soprattutto per la selezione di oggetti distanti [50]. Ulteriori studi successivi hanno ottenuto i medesimi risultati [51], [52]. Il seguente studio fornisce la base per uno specifico ma altamente diffuso modello di puntamento e selezione [53]. Lo studio si propone di stabilire una base di riferimento per la valutazione delle interazioni tramite eye-

tracking, in quanto confrontare le prestazioni delle diverse modalità di input in un HMD, come controller, movimento della testa e degli occhi, rappresenta ancora oggi una sfida. La difficoltà risiede nel prevedere quale modalità offra prestazioni superiori, poiché il confronto non è semplice e spesso dipende dal contesto specifico in cui viene utilizzata ciascuna modalità di input. Ci sono molti compromessi da considerare, ma le basi per confrontare efficacemente i compromessi tra metodi di input e tecniche di interazione in modo equo e valido mancano di una base coerente. La Figura 19 mostra come avviene la selezione con le diverse modalità di input. L'eye-tracking per la selezione di target non è una novità, ma la sua affidabilità è stata spesso messa in discussione a causa di idee errate sulla sua precisione e usabilità. Studi precedenti [54] hanno infatti documentato prestazioni inferiori dell'eye-tracking nei compiti di puntamento e selezione rispetto al tracciamento della testa, spesso utilizzando il task di selezione reciproca dell'ISO 9241-9, standard che stabilisce linee guida uniformi e procedure di test per valutare i dispositivi puntatori per computer [55].

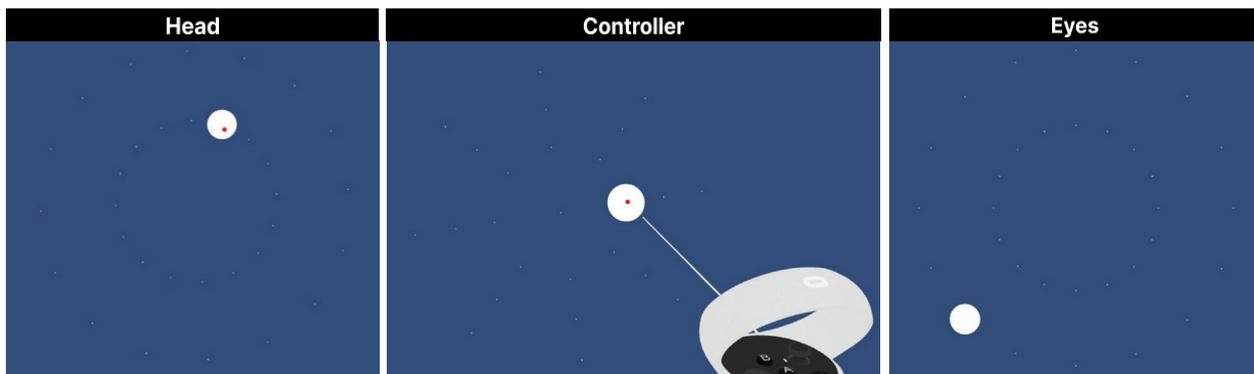


Figura 19 Selezione con diverse modalità di input

Questi studi sollevano limiti nelle valutazioni precedenti e sottolineano la necessità di una rivalutazione dell'eye tracking come modalità di input valida nella VR. Lo studio attuale confronta l'eye-tracking non modificato (senza cursore o feedback) con input tramite controller e tracciamento della testa. Durante l'esperimento, ogni partecipante ha selezionato 1098 target in diverse condizioni rappresentative di task di puntamento e selezione in AR/VR, inclusi gli standard tradizionali che quelli più allineati con le interazioni AR/VR moderne.

I target sono presentati come oggetti circolari di colore bianco e disposti in configurazioni simili all'ISO 9241-9 e in un formato alternativo con target più distribuiti vicino al centro. In Figura 20, vengono illustrate le due configurazioni utilizzate per i test. Lo studio esplora gli effetti di diversi layout (coordinate planari vs. sferiche) e diametri dei target sulle prestazioni di selezione. I risultati indicano che l'eye-tracking non modificato ha prestazioni comparabili con l'input tramite controller e supera il tracciamento della testa in termini di produttività. L'eye-tracking mostra un miglioramento del 27,9% rispetto al tracciamento della testa e solo una riduzione del 5,63% rispetto all'input tramite controller. Tuttavia, l'eye tracking presenta un tasso di errore di selezione più elevato, in linea con i risultati precedenti.

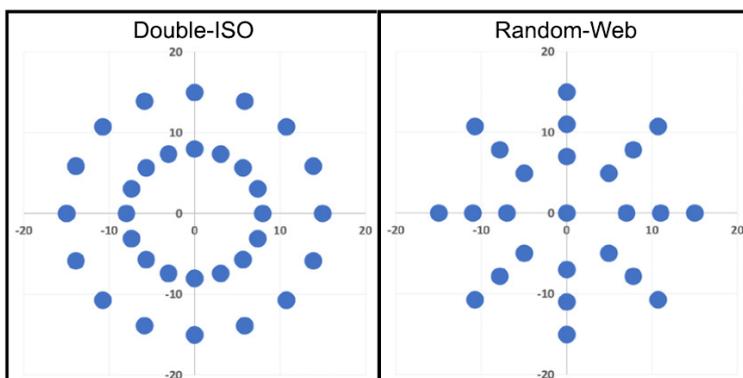


Figura 20 Modelli Double- ISO (sinistra) e modello Random-WEB (destra) utilizzati durante i test

Le valutazioni soggettive dei partecipanti indicano una preferenza per l'eye-tracking e gli input tramite controller rispetto al tracciamento della testa. La modalità eye-tracking è risultata meno faticosa del previsto, in linea con alcune ricerche precedenti. I partecipanti hanno notato la naturalezza e la facilità dell'eye tracking una volta abituati, mentre il controller è stato apprezzato per la sua precisione e facilità d'uso.

Lo studio stabilisce una base di riferimento per confrontare l'eye tracking con altre modalità di interazione nella VR. Viene messa in dubbio l'adeguatezza dello standard ISO 9241-9 per la valutazione dell'eye tracking e viene proposto un layout alternativo per i compiti di puntamento e selezione. I risultati suggeriscono che l'eye tracking può essere una modalità di input valida per le interazioni VR, superando il tracciamento della testa e avendo prestazioni comparabili con l'input tramite controller in molte misure.

Questo studio ha fornito la base metodologica per la realizzazione dei test del progetto, adattando opportunamente i processi sperimentali alle specifiche esigenze della ricerca. Nello specifico, è stato eseguito un confronto tra la BCI NextMind e il sistema di eye-tracking integrato nel visore HoloLens 2. È importante notare che il NextMind supporta solo 10 NeuroTag alla volta, il che ha rappresentato una limitazione significativa nel lavoro. Un'ulteriore differenza rispetto allo studio di riferimento è l'utilizzo della realtà aumentata proiettata invece della realtà virtuale. Inoltre, mentre lo studio di base si è focalizzato esclusivamente sulla selezione di target in un contesto statico, la ricerca ha esteso l'analisi includendo anche il contesto dinamico, introducendo target in movimento. Questa innovazione ha permesso di esplorare e confrontare le prestazioni dei dispositivi sia in scenari statici che dinamici, fornendo un quadro più completo delle capacità e delle limitazioni delle tecnologie di input esaminate.

Infine, nello studio ho introdotto la variabile dei distrattori per analizzare la risposta degli utenti in un contesto in cui la loro attenzione nella selezione di un target può essere distratta da altri elementi nella scena. Questa aggiunta ha permesso di valutare ulteriormente l'efficacia delle tecnologie di input in situazioni realistiche e complesse. Questa estensione del contesto sperimentale non solo aggiunge una nuova dimensione alla valutazione delle prestazioni delle BCI e dell'eye-tracking, ma contribuisce anche a una comprensione più approfondita delle potenzialità di queste tecnologie in applicazioni reali e variabili.

Capitolo 4

Tecnologie

Questo capitolo esplorerà in dettaglio le tecnologie hardware e software utilizzate nel corso dello sviluppo del progetto. Saranno analizzati i vari componenti hardware insieme alle piattaforme software utilizzate per integrare le funzionalità di realtà aumentata proiettata, eye-tracking e BCI.

4.1 Tecnologie Hardware

4.1.1 Proiettore laser

Il proiettore utilizzato per la realizzazione del progetto è l'LG HF80LA [56], il quale rappresenta una scelta adatta a coloro che cercano una soluzione di proiezione versatile e di alta qualità, specialmente in ambiti come l'educazione, le presentazioni e le applicazioni di PAR, che richiedono performance affidabili e avanzate. Grazie alle sue caratteristiche tecniche e alla sua flessibilità di utilizzo, il proiettore laser, illustrato in Figura 21, si adatta perfettamente alle esigenze della PAR, contribuendo a trasformare spazi fisici in esperienze digitali immersive e interattive. La tecnologia LED, la risoluzione Full HD e la portabilità sono le caratteristiche che distinguono il proiettore LG HF80LA dai modelli tradizionali. Le innovazioni apportate a questo modello, non solo migliorano la qualità dell'immagine e l'efficienza energetica, ma rendono anche il HF80LA una scelta ideale per applicazioni avanzate di PAR, dove la qualità visiva e la flessibilità operativa sono fondamentali.



Figura 21 Proiettore laser LG HF80LA

Nella realtà aumentata proiettata, la precisione e la chiarezza delle immagini sono fondamentali per creare esperienze interattive realistiche. La tecnologia LED garantisce che le immagini proiettate siano nitide e facilmente visibili, riproducendo con i dettagli più minuziosi. La lunga durata della lampada LED implica che i proiettori possono essere utilizzati intensivamente senza interruzioni per la manutenzione, rendendoli ideali per installazioni permanenti o utilizzi frequenti in ambienti educativi e professionali.

4.1.2 HoloLens 2

Microsoft HoloLens 2 è un dispositivo di realtà aumentata avanzato progettato per combinare il mondo fisico con elementi digitali, creando esperienze immersive e interattive [57]. Lanciato nel 2019 come successore del primo HoloLens, HoloLens 2, di cui si può osservare un esempio in Figura 22, offre miglioramenti significativi in termini di comfort, prestazioni e funzionalità, rendendolo uno strumento potente per applicazioni professionali e aziendali.



Figura 22 Microsoft HoloLens 2

Microsoft HoloLens 2 è dotato di una visiera facilmente sollevabile, che consente agli utenti di passare rapidamente dalla realtà mista al mondo reale senza dover rimuovere il dispositivo. Utilizza un display olografico avanzato con una risoluzione di 2K per occhio, offrendo immagini nitide ed estremamente ricche di dettagli. Rispetto al modello precedente, il campo visivo è stato raddoppiato garantendo una migliore immersione visiva. HoloLens 2 supporta l'interazione naturale attraverso gesti, voce e tracciamento oculare. Gli utenti possono manipolare ologrammi e interfacce digitali in modo intuitivo, col semplice utilizzo delle mani oppure semplicemente impartendo comandi vocali. L'innovazione principale è l'aggiunta del sistema di tracciamento oculare (eye-tracking). Quest'ultimo si compone di 2 telecamere a infrarossi per determinare i movimenti degli occhi con estrema precisione consentendo di monitorare ad ogni istante la posizione dello sguardo dell'utente. Grazie all'eye tracking, gli utenti possono selezionare elementi virtuali o attivare comandi semplicemente guardando un punto specifico. Questa funzionalità è particolarmente utile in contesti in cui le mani dell'utente sono occupate o nei casi di utenti con disabilità motorie, permettendo loro di interagire utilizzando solo il movimento degli occhi. La Tabella 1 riassume le principali specifiche tecniche di HoloLens 2, evidenziando le sue capacità di tracciamento, interazione e connettività.

Caratteristica	Descrizione
Processore	Qualcomm Snapdragon 850
Sistema Operativo	Windows Holographic OS
Risoluzione	2K 3:2 light engines per eye, risoluzione totale 2048 x 1080 per occhio
Campo Visivo (FOV)	Diagonale di circa 52 gradi, il doppio del FOV di HoloLens 1
Tracciamento Ambientale	4 videocamere di tracciamento ambientale (inside-out tracking)
Tracciamento Oculare	2 telecamere a raggi infrarossi
Sensori	Accelerometro, giroscopio, magnetometro, sensore di luminosità ambientale, sensori di profondità
Audio	Sistema audio spatial sound con 5 altoparlanti integrati
Connettività	Wi-Fi 5 (802.11ac), Bluetooth 5.0, USB-C
RAM	4 GB LPDDR4x
Archiviazione	64 GB UFS 2.1
Peso	566 grammi
Interazione	Gaze (sguardo), Gesture (gesti), Voice (voce), Eye-tracking (tracciamento oculare)
Batteria	Fino a 2-3 ore di uso continuo, ricaricabile tramite USB-C

Tabella 1 Caratteristiche tecniche HoloLens 2

4.1.3 NextMind

Il dispositivo NextMind [58], raffigurato in Figura 23, è una BCI di tipo non invasivo, caratterizzata da sensori a contatto diretto con lo scalpo. Esso sfrutta la tecnologia EEG per rilevare l'attività cerebrale in seguito alla stimolazione della corteccia visiva e tradurla in comandi eseguibili.



Figura 23 Dispositivo NextMind [70]

La caratteristica distintiva di NextMind è il suo design compatto e leggero, che ne facilita il trasporto e ne consente l'utilizzo in vari contesti. Il dispositivo viene indossato tramite una fascia regolabile e presenta nove sensori che devono essere a contatto con la parte posteriore della testa. In particolare, NextMind è capace di riconoscere specifici impulsi visivi generati da un componente denominato NeuroTag, rappresentato in Figura 24. Il NeuroTag è un segnale visivo unico, caratterizzato da una specifica frequenza di lampeggiamento (anche conosciuta come flickering). Quando un individuo osserva un NeuroTag, il cervello genera un segnale elettrico a una frequenza corrispondente al flickering del NeuroTag stesso. Questi segnali, noti come SSVEP, vengono rilevati mediante EEG sfruttando algoritmi avanzati. Gli algoritmi impiegati per rilevare la selezione del target si basano tipicamente su tecniche di analisi del segnale EEG, come la trasformata di Fourier o algoritmi di machine learning. Questi algoritmi elaborano i dati registrati per identificare le frequenze SSVEP correlate alla selezione di un determinato stimolo visivo, consentendo all'utente di interagire intuitivamente con l'ambiente digitale attraverso il controllo mentale.

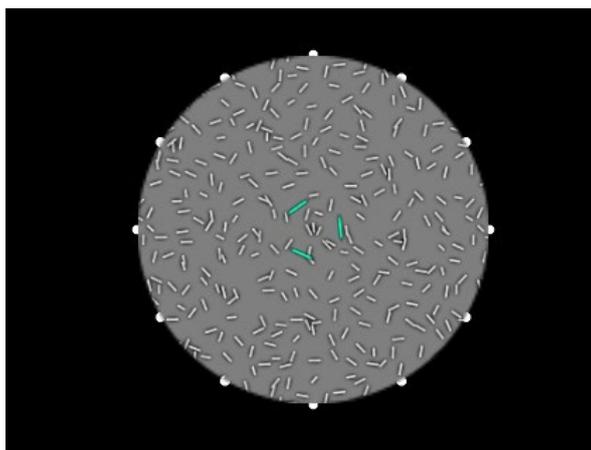


Figura 24 Esempio di NeuroTag

Per quanto riguarda la tipologia degli elettrodi, NextMind impiega elettrodi a secco. L'uso di gel conduttivi tuttavia può garantire una migliore conducibilità e ridurre il rumore durante la registrazione dell'attività cerebrale. Il dispositivo NextMind richiede una calibrazione accurata per garantire risultati ottimali durante l'utilizzo. La calibrazione è un passaggio fondamentale che consente di adattare il sistema alle caratteristiche individuali dell'utente, come la distribuzione dei segnali cerebrali e la sensibilità degli elettrodi.

La connessione di NextMind al computer avviene tramite Bluetooth. Questo offre un'ampia libertà di movimento e una facile installazione senza le limitazioni causate dalla presenza dei cavi fisici. Una volta identificata la frequenza del flickering del NeuroTag, NextMind traduce questa informazione in un comando interpretabile. Successivamente i comandi vengono inviati al computer tramite la connessione Bluetooth. Questo avviene in tempo reale, garantendo una risposta immediata e precisa alle azioni dell'utente. Il software NextMind presente sul computer riceve i comandi trasmessi e li interpreta per controllare applicazioni o dispositivi digitali. Questo può includere la selezione di oggetti su uno schermo, il controllo di giochi, la navigazione in applicazioni di realtà aumentata o virtuale, e molte altre interazioni digitali. Le caratteristiche tecniche di NextMind sono descritte in Tabella 2.

Caratteristica	Descrizione
Tecnologia	Interfaccia BCI non invasiva basata su EEG
Sensori	9 di tipo EEG
Connettività	Bluetooth 5.0, USB-C
Peso	100 grammi
Batteria	Batteria Fino a 4 ore di utilizzo continuo, ricaricabile tramite USB-C

Tabella 2 Caratteristiche tecniche NextMind

Il NextMind SDK [59] rappresenta un componente fondamentale per lo sviluppo di applicazioni basate sull'interfaccia NextMind all'interno dell'ambiente di sviluppo Unity. Questo sofisticato strumento consente agli sviluppatori di implementare controlli basati sull'attività cerebrale, aprendo nuove frontiere nell'interazione umana con la tecnologia digitale. Gli sviluppatori devono scaricare il SDK direttamente dal sito ufficiale di NextMind e integrarlo nel proprio progetto Unity. Il NextMind SDK è costituito da due elementi principali: il NeuroTag e il NeuroManager, che gestisce la comunicazione tra i NeuroTag nella scena Unity e il NextMind. Una volta integrato, il NextMind SDK fornisce agli sviluppatori gli strumenti necessari per rilevare e interpretare i segnali EEG (elettroencefalografici) generati dall'interazione dell'utente con i NeuroTag. Inoltre, permette la simulazione degli input, la gestione della connessione Bluetooth e di acquisire dati dal dispositivo NextMind, quali il livello della batteria e la qualità dei contatti. La versione attuale del SDK supporta fino a 10 NeuroTag attivi contemporaneamente. Il funzionamento del NextMind SDK è riassunto in Figura 25.

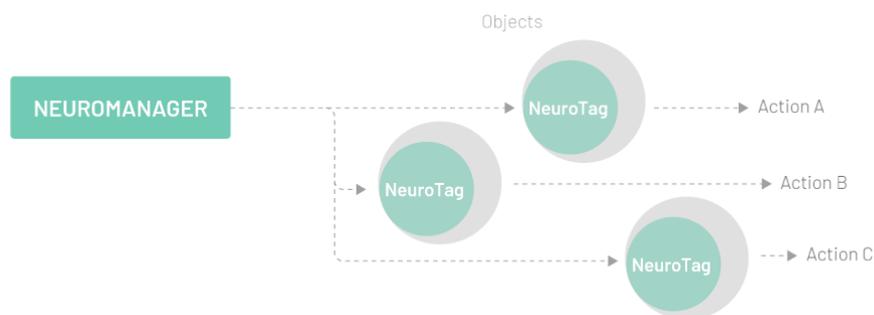


Figura 25 Gestione del NeuroManager della comunicazione tra NeuroTags e NextMind

4.2 Tecnologie Software

4.2.1 Unity

Unity [60] è una piattaforma di sviluppo integrata ampiamente utilizzata per la creazione di giochi, applicazioni interattive, simulazioni e esperienze di VR e AR. Grazie alla sua versatilità e potenza, Unity è diventato uno strumento fondamentale per sviluppatori e ricercatori in vari settori. Unity dispone di un motore grafico altamente ottimizzato per il rendering di scene 2D e 3D complesse, con supporto per tecnologie avanzate come il ray tracing e l'illuminazione globale. Consente di sviluppare applicazioni una volta sola e distribuirle su diverse piattaforme, tra cui Windows, macOS, Android, iOS, WebGL, PlayStation, Xbox e molte altre. L'editor di Unity, mostrato in Figura 26, offre un'interfaccia visiva intuitiva per la progettazione di scene, la gestione delle risorse e il testing delle applicazioni. Questo semplifica il processo di sviluppo e consente modifiche e miglioramenti rapidi e continui del design.

Il funzionamento di Unity si basa su un ciclo continuo di sviluppo, test e ottimizzazione. Gli sviluppatori possono creare oggetti di gioco (game objects) e assegnare loro componenti come script, fisica, animazioni e interazioni. Grazie al linguaggio C#, è possibile scrivere script che definiscono comportamenti complessi e reattivi. L'editor di Unity consente di visualizzare e verificare immediatamente le modifiche apportate, offrendo un feedback visivo immediato. Le due applicazioni sviluppate per questo progetto sono state interamente realizzate utilizzando Unity. Per lo sviluppo dell'applicazione destinata a Microsoft HoloLens 2, è stato integrato il Mixed Reality Toolkit (MRTK), mentre per l'applicazione basata su NextMind, è stato utilizzato il NextMind SDK.

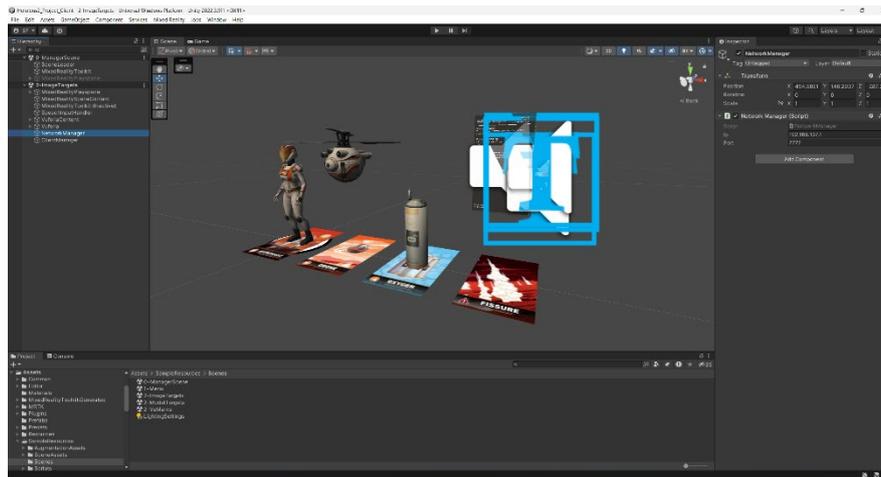


Figura 26 Unity UI

4.2.2 Mixed Reality Toolkit

Il Mixed Reality Toolkit (MRTK) è una suite di strumenti sviluppate da Microsoft che facilita la creazione di esperienze immersive in realtà mista. Il MRTK offre un insieme di risorse e componenti software che consentono agli sviluppatori di creare applicazioni avanzate e integrate con facilità. Supporta funzionalità avanzate come l'interazione gestuale e vocale, il rilevamento dell'ambiente circostante, l'eye-tracking, il rendering spaziale e altre funzionalità specifiche dei dispositivi di realtà aumentata. Ciò permette agli sviluppatori di sfruttare appieno le capacità hardware dei dispositivi per creare esperienze immersive e realistiche. Questo toolkit ha permesso di sfruttare completamente le capacità di eye-tracking e altre funzionalità avanzate di HoloLens 2.

4.2.3 Vuforia Engine

Vuforia Engine [61] rappresenta una piattaforma avanzata per lo sviluppo di applicazioni di Realtà Aumentata, particolarmente rilevante nell'ambito di dispositivi come Microsoft HoloLens 2. Questo software offre strumenti potenti per la creazione di esperienze interattive che integrano elementi digitali nel mondo fisico, sfruttando tecnologie avanzate di riconoscimento visivo come gli image targets e altri marcatori visivi. Un image target è un'immagine bidimensionale o tridimensionale che funge da punto di riferimento visivo per il sistema di AR. Può essere un'immagine stampata su carta, un oggetto fisico con caratteristiche uniche, o una superficie specifica all'interno di un ambiente. Alcuni esempi di image target sono illustrati in Figura 27. Questi marcatori sono essenziali perché consentono al software di AR di stabilire la posizione e l'orientamento di oggetti digitali sovrapposti alla scena fisica. Gli image target sono selezionati in base alle loro caratteristiche visive distintive, come colori, pattern, forme o strutture geometriche. Queste caratteristiche permettono al software di AR di identificare e distinguere l'image target da altri elementi nell'ambiente. Quando un image target viene rilevato dalla telecamera o dai sensori del dispositivo AR, il software esegue un processo di riconoscimento che consiste nel confrontare l'immagine catturata con un modello predefinito o con caratteristiche memorizzate nel sistema. Una volta identificato, il sistema calcola la sua posizione e orientamento nello spazio fisico.



Figura 27 Esempi di image targets usati da Vuforia

Vuforia offre strumenti avanzati per lo sviluppo di interfacce utente AR intuitive e personalizzabili. Questo aspetto è cruciale per garantire un'esperienza fluida e coinvolgente per gli utenti finali. Supporta una vasta gamma di piattaforme tra cui iOS, Android, Unity, e Unreal Engine, facilitando lo sviluppo multi-piattaforma e la distribuzione delle applicazioni AR su dispositivi mobili e desktop. Grazie alla capacità di analizzare dati in tempo reale, Vuforia assicura un tracciamento preciso e una resa grafica ottimale degli oggetti virtuali all'interno dell'ambiente fisico. Trova applicazioni estese in settori come educazione e formazione, marketing e pubblicità, supporto tecnico e manutenzione, e sviluppo industriale. È utilizzato per creare simulazioni educative immersive, campagne pubblicitarie interattive, assistenza remota basata su AR per la manutenzione industriale, e per ottimizzare la progettazione e la produzione di prodotti industriali.

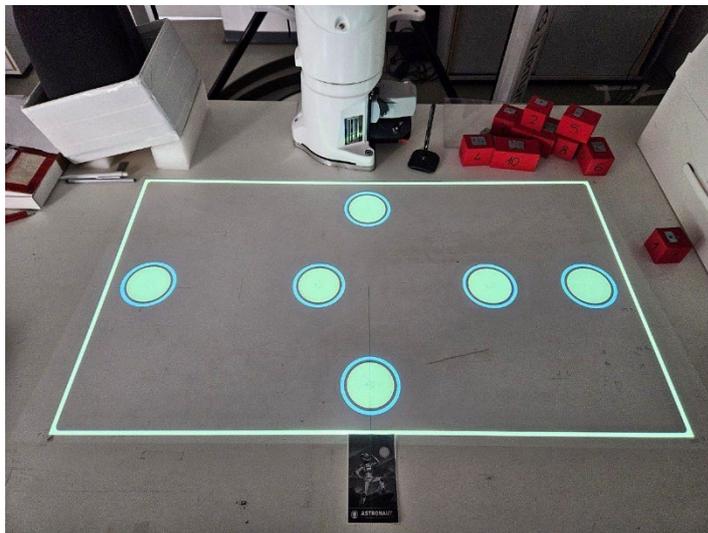


Figura 28 Posizionamento Image Target durante i test

Vuforia Engine è stato fondamentale per il successo del progetto, in quanto ha permesso di stabilire un sistema di riferimento fisso, essenziale per il posizionamento preciso dei target virtuali. La scelta di Vuforia si basa sulla sua capacità di riconoscere e tracciare con precisione gli image target, consentendo di stabilire un riferimento fisso nello spazio fisico che può essere utilizzato per allineare con precisione i target virtuali con i target fisici proiettati. Questo allineamento ha specificamente garantito che i collider dei target virtuali apparissero al di sopra dei target fisici proiettati, mantenendo una coerenza spaziale cruciale per l'interazione accurata e intuitiva degli utenti con l'ambiente di realtà aumentata proiettata. L'immagine target, che funge da punto di riferimento per il sistema di coordinate, è stato posizionato strategicamente al di sotto dell'area proiettata dal proiettore. Questa posizione, illustrata in Figura 28, è stata scelta per garantire che l'immagine target sia facilmente visibile e accessibile all'utente, minimizzando qualsiasi sforzo o movimento non necessario.

Il posizionamento preciso dell'immagine target è cruciale poiché determina la stabilità e l'accuratezza del sistema di coordinate dell'intera applicazione. Quando l'applicazione viene avviata, l'utente è invitato ad osservare l'immagine target. Una volta che l'immagine target è stato riconosciuto, Vuforia Engine stabilisce un centro di riferimento fisso nel sistema di coordinate virtuale. Il centro di riferimento serve per tutte le successive operazioni di tracciamento spaziale ed è fondamentale per garantire che gli ologrammi rimangano stabili e allineati con il mondo fisico, indipendentemente dai movimenti dell'utente o del dispositivo.

Per evitare che durante il test l'utente osservi nuovamente l'immagine target, modificando così il centro di riferimento, l'immagine target viene coperto subito dopo essere stato rilevato. In questo modo, l'immagine target non è più visibile all'utente, garantendo che il centro di riferimento rimanga costante. La robustezza e l'affidabilità del sistema di tracciamento di Vuforia hanno quindi giocato un ruolo chiave nel migliorare l'esperienza utente e nell'assicurare la precisione necessaria per le applicazioni sviluppate.

4.2.4 Riptide Networking

Riptide Networking [62] è una libreria in C# sviluppata per facilitare lo sviluppo di applicazioni multiplayer nell'ambiente di sviluppo Unity. La robusta architettura client-server di Riptide Networking consente di gestire molteplici giocatori in simultanea, facilitando la sincronizzazione di dati critici come posizioni degli oggetti, stati di gioco e input utente. Le sue principali funzionalità includono il trasferimento di dati affidabile tramite protocolli TCP e UDP, la gestione avanzata delle connessioni, l'implementazione di eventi di rete che notificano gli aggiornamenti di stato e il supporto per la sicurezza delle comunicazioni tramite crittografia dei dati sensibili. Queste caratteristiche consentono agli sviluppatori di concentrarsi sul design del gioco o dell'applicazione senza dover affrontare le complessità della programmazione di rete a basso livello.

Capitolo 5

Progettazione e Sviluppo

Questo capitolo esplora dettagliatamente il funzionamento operativo delle due applicazioni sviluppate nel contesto della ricerca, evidenziando il modo in cui gli utenti interagiscono con l'ambiente di realtà aumentata proiettata e come avviene la selezione dei target.

5.1 Introduzione

Nell'ambito del progetto, sono state progettate e sviluppate due applicazioni distinte: una per il dispositivo HoloLens 2 e una per il dispositivo NextMind. La necessità di progettare due applicazioni separate è emersa per mantenere i componenti specifici di ciascun dispositivo isolati, evitando così problemi di incompatibilità e assicurando una gestione chiara e distinta delle funzionalità. Ciascuna applicazione offre un'interfaccia utente e specifiche caratteristiche progettate per facilitare il confronto delle due interfacce.

5.2 Interfacce utente

Entrambe le applicazioni presentano una interfaccia utente simile, progettata per semplificare l'avvio dei test e la personalizzazione delle impostazioni per ogni utente. Nella scena, è possibile inserire diversi parametri attraverso campi di input dedicati. Tra i parametri disponibili, è inclusa l'altezza dell'utente, utile per personalizzare l'interazione con l'ambiente virtuale in base alle dimensioni fisiche dell'utente stesso. Questo campo accetta valori numerici espressi in centimetri. Inoltre, è presente un campo per inserire un ID univoco assegnato all'utente, che facilita la raccolta e l'analisi dei dati specifici per ciascun individuo. Per gestire meglio l'interazione, è stato aggiunto un bottone che permette di attivare o disattivare i distrattori prima di avviare i diversi task. Nella Figura 29 è illustrata l'interfaccia utente dell'applicazione NextMind, mentre nella Figura 30 l'interfaccia utente dell'applicazione HoloLens 2. La scena include opzioni per avviare differenti tipologie di test, selezionabili attraverso semplici comandi da tastiera:

- **Test Statico:** Premendo il tasto 'S', viene avviata la sequenza del test statico. In questa modalità, i target rimangono fermi, consentendo di valutare la precisione e la velocità di selezione senza la variabile del movimento.
- **Test Dinamico:** Premendo il tasto 'D', viene avviata la sequenza del test dinamico. Questa modalità introduce target in movimento, permettendo di analizzare le performance dell'utente in condizioni più impegnative e realistiche.
- **Prova Utente:** Premendo il tasto '0' della tastiera alfanumerica viene avviato un test diagnostico, rappresentato in Figura 31, progettato per consentire agli utenti di eseguire una prova di selezione dei target, sia statici che dinamici. Questo test è finalizzato a garantire il corretto funzionamento del sistema e a preparare gli utenti ai successivi test.

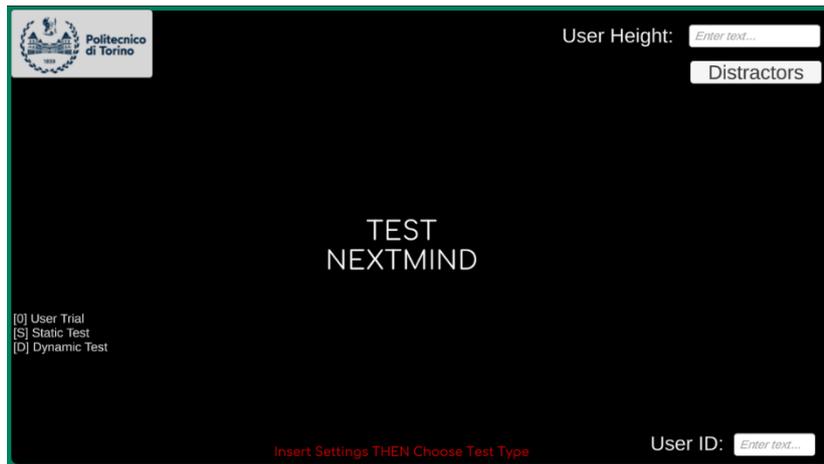


Figura 29 Interfaccia Utente Applicazione NextMind

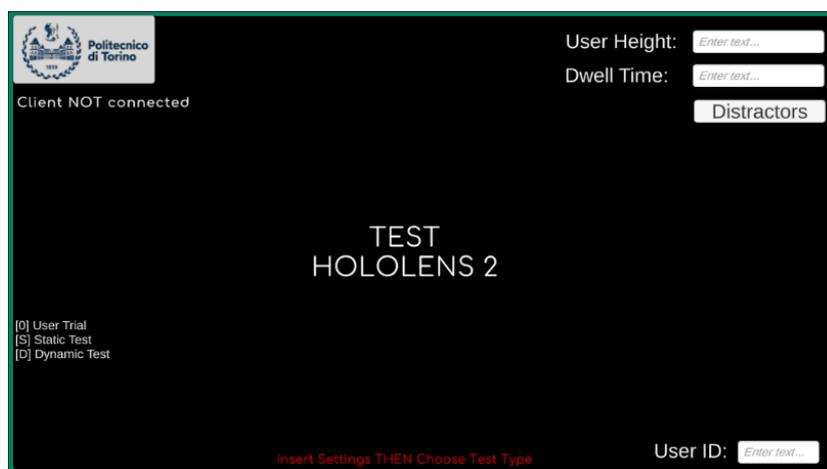


Figura 30 Interfaccia Utente Applicazione HoloLens 2

Nel contesto dell'applicazione per HoloLens 2, è possibile configurare il parametro dwell time, che rappresenta il tempo durante il quale l'utente deve osservare un target affinché la selezione venga considerata confermata. Inoltre, è presente una stringa che indica lo stato della connessione con il client. "*Client not connected*" indica che il client non è mai stato connesso, "*Client successfully connected*" indica che la connessione è stata stabilita correttamente, mentre "*Client disconnected*" indica che il client è stato disconnesso. Queste informazioni sono utili per monitorare lo stato della connessione tra il dispositivo HoloLens 2 e il server, fornendo indicazioni chiare sullo stato attuale della comunicazione, essenziale per il corretto funzionamento e la gestione dell'applicazione.

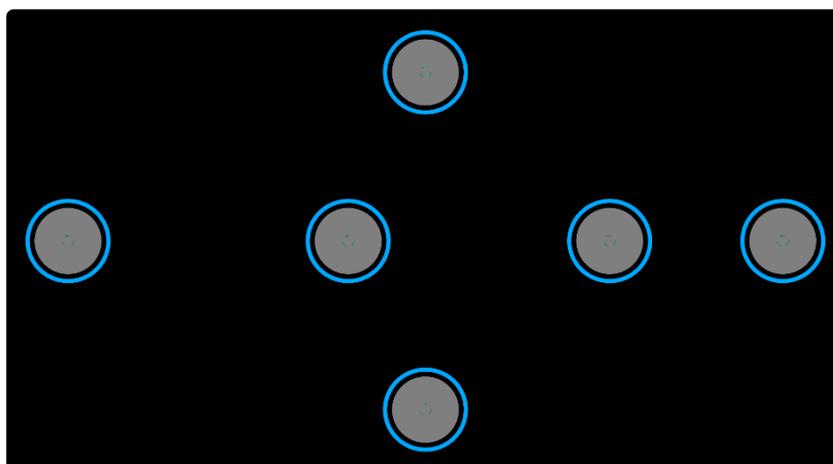


Figura 31 Prova Utente Applicazione HoloLens2

5.3 Applicazione NextMind

5.3.1 Calibrazione

La calibrazione è la scena iniziale dell'applicazione NextMind, ed è uno step essenziale per adattare il sistema alle caratteristiche neurali individuali di ciascun utente. Questo passaggio permette di personalizzare l'interfaccia BCI, ottimizzando le prestazioni del dispositivo e assicurando che le interazioni neurali siano tradotte in comandi digitali con la massima precisione possibile. Senza una calibrazione accurata, l'efficacia del dispositivo sarebbe significativamente ridotta.

La fase di calibrazione è fondamentale non solo per garantire un'accurata interpretazione dei segnali neurali, ma anche per migliorare l'esperienza complessiva dell'utente. Una calibrazione corretta riduce la latenza e aumenta la precisione dei comandi neurali, rendendo l'interazione con l'applicazione più fluida ed efficiente. Prima dell'avvio della calibrazione del dispositivo NextMind, viene eseguito un controllo della qualità dei sensori presenti sull'interfaccia neurale. Come evidenziato in Figura 32, questo processo utilizza una rappresentazione visiva dei sensori tramite colori per valutare l'efficacia del contatto degli elettrodi con la superficie cutanea. Nello specifico, il colore grigio o rosso indica una mancanza di contatto tra gli elettrodi e la pelle, il che può compromettere la qualità del segnale. Il colore giallo indica un contatto parziale, mentre il verde indica un'eccellente qualità del segnale ricevuto, suggerendo un contatto stabile e adeguato tra gli elettrodi e la pelle. Questo processo di controllo della qualità dei sensori assicura che il dispositivo NextMind sia correttamente configurato per raccogliere e interpretare in modo accurato i segnali neurali dell'utente durante l'uso, migliorando così l'affidabilità e le prestazioni dell'interfaccia neurale.

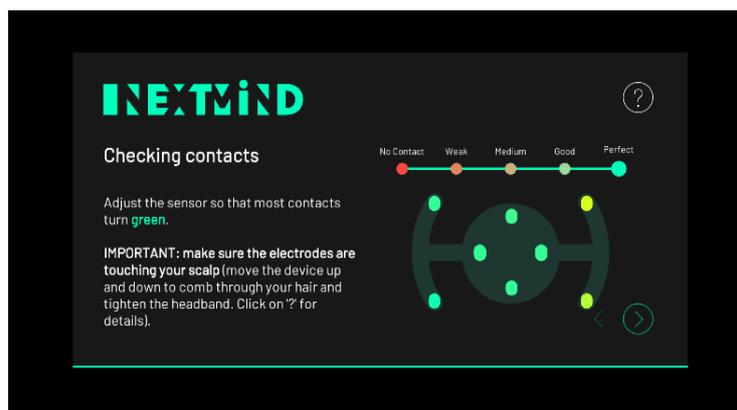


Figura 32 Controllo qualità contatti NextMind

Successivamente al controllo della qualità dei contatti, l'utente procede con l'effettiva calibrazione del NextMind. Durante questo processo, mostrato in Figura 33, vengono presentati in sequenza 12 NeuroTag. L'utente è tenuto a mantenere la concentrazione su ciascun NeuroTag, e, una volta selezionato, viene fornito un feedback visivo per confermare la corretta focalizzazione.

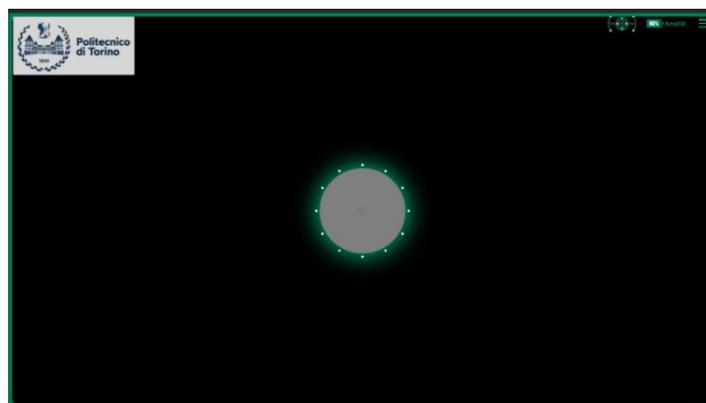


Figura 33 NeuroTag selezionato durante la calibrazione

Come si evince dalla Figura 34, al termine della calibrazione, viene assegnato un punteggio che varia da 1 a 5, dove 1 indica una calibrazione insufficiente e 5 indica una calibrazione eccellente.

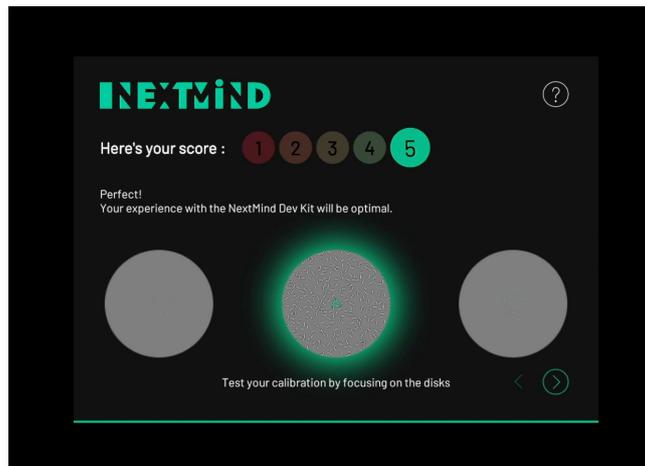


Figura 34 Risultato Calibrazione

Questo punteggio rappresenta la qualità finale della calibrazione e gioca un ruolo cruciale nella corretta interpretazione dei segnali neurali da parte della BCI. Una calibrazione con punteggio elevato è fondamentale per garantire la precisione dell'interfaccia neurale, poiché una calibrazione di bassa qualità comporterebbe una significativa imprecisione nella rilevazione e interpretazione dei segnali. Nel corso dei test utente, sono stati considerati validi tutti i punteggi di calibrazione pari o superiori a 3. Questo criterio assicura un livello sufficiente di accuratezza e affidabilità nel funzionamento dell'interfaccia neurale, minimizzando gli errori dovuti a calibrazioni imprecise.

5.3.2 Architettura del sistema

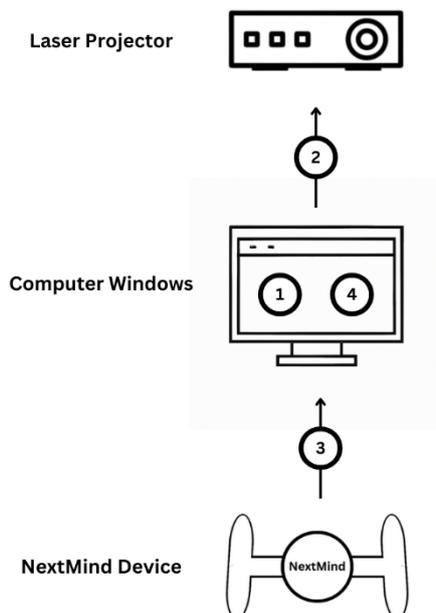


Figura 35 Architettura del sistema Proiettore-Computer-NextMind

Nella Figura 35 è rappresentato il diagramma dell'architettura del sistema, sintetizzato nelle seguenti quattro fasi principali:

- 1) **Inizializzazione del Sistema:** L'applicazione Unity viene avviata su un computer con sistema operativo Windows, preparando l'ambiente per l'interazione e la gestione dei processi.
- 2) **Proiezione dell'Interfaccia Utente:** L'interfaccia utente dell'applicazione viene proiettata nell'area di lavoro designata, consentendo agli utenti di interagire visivamente con il sistema.
- 3) **Trasmissione dei Dati dei target:** Quando un utente seleziona un NeuroTag tramite il dispositivo NextMind, il segnale corrispondente viene trasmesso all'applicazione Unity tramite connessione Bluetooth, specificando quale NeuroTag è stato scelto.
- 4) **Elaborazione del target Selezionato:** Il sistema riceve il segnale trasmesso e procede all'elaborazione, identificando il NeuroTag selezionato e attuando le operazioni previste in risposta alla scelta effettuata dall'utente, garantendo una reazione adeguata e tempestiva.

5.3.3 Diagramma di flusso selezione NeuroTag con NextMind

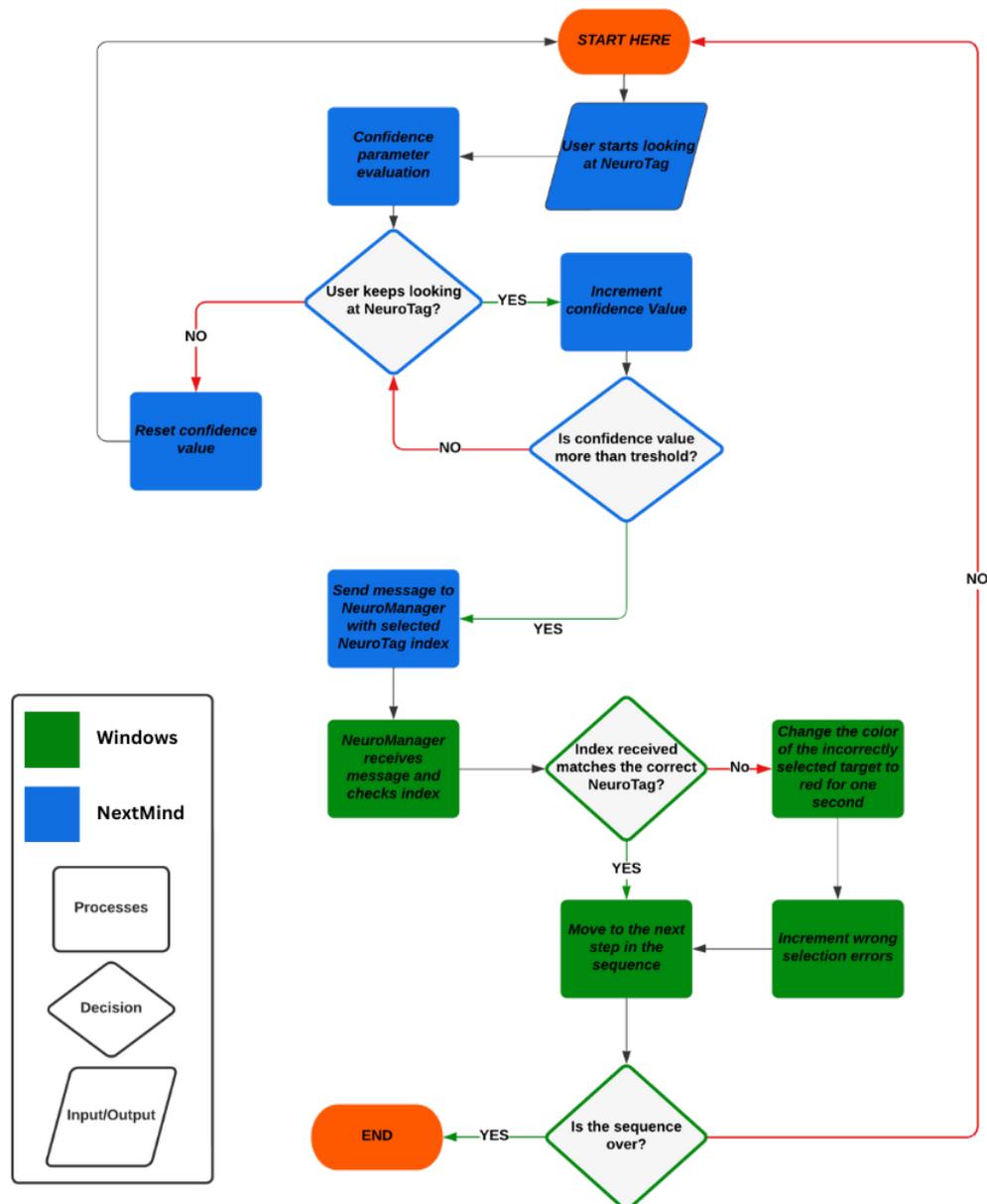


Figura 36 Diagramma di flusso selezione NeuroTag con NextMind

Nel diagramma di flusso schematizzato in Figura 36, il processo inizia quando l'utente inizia a guardare il NeuroTag. Questo evento avvia un processo di verifica del parametro "confidence", un parametro utilizzato dagli algoritmi di NextMind per determinare la selezione di un NeuroTag. Durante l'osservazione del NeuroTag da parte dell'utente, il parametro "confidence" viene incrementato continuamente. Se l'utente smette di guardare il NeuroTag, il parametro viene resettato. Il sistema verifica costantemente se il parametro "confidence" supera una certa soglia prestabilita. In caso affermativo, viene inviato un messaggio al NeuroManager contenente l'indice del NeuroTag selezionato. Il NeuroManager riceve l'indice e un metodo specifico verifica se l'indice ricevuto corrisponde al NeuroTag corretto nella sequenza. Se la corrispondenza è corretta, il sistema procede allo step successivo della sequenza. Se l'indice non corrisponde, viene attivato un timer di 1 secondo, il NeuroTag selezionato erroneamente si illumina di rosso fino allo scadere del timer, e viene incrementato un contatore che registra gli errori di selezione. Successivamente, il sistema procede comunque allo step successivo della sequenza. Alla fine di ogni step, viene verificato se la sequenza è completata. Se la sequenza è giunta al termine, il processo di selezione si conclude. In caso contrario, il sistema ritorna in attesa che l'utente inizi nuovamente a guardare un NeuroTag, riprendendo così il ciclo descritto.

5.4 Applicazione HoloLens 2

5.4.1 Calibrazione

La fase di eye calibration di HoloLens 2 è un passaggio essenziale per assicurare che il dispositivo possa tracciare con precisione i movimenti oculari dell'utente. Questa precisione è fondamentale per il corretto funzionamento delle applicazioni basate su eye-tracking, poiché consente una selezione accurata dei target e un'interazione naturale e intuitiva con gli ologrammi.

L'applicazione di calibrazione può essere eseguita attraverso l'applicazione Impostazioni, oppure quando un utente non calibrato avvia un'applicazione che utilizza il tracciamento oculare.

All'avvio dell'applicazione, l'utente è guidato attraverso la procedura di eye calibration. Questo processo inizia con l'adattamento del visore HoloLens 2, assicurandosi che sia posizionato correttamente sulla testa dell'utente e che i sensori di tracciamento oculare abbiano una visuale chiara degli occhi. Come si può osservare in Figura 37, il sistema utilizza un insieme di elementi visivi, che vengono proiettati nell'ambiente virtuale e che l'utente deve seguire esclusivamente con lo sguardo senza muovere la testa.

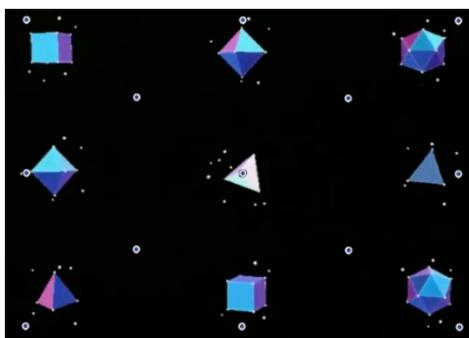


Figura 37 Elementi visivi mostrati durante la calibrazione [71]

Durante questa fase, il visore raccoglie dati sul movimento oculare dell'utente, tracciando come gli occhi seguono i punti di calibrazione. Questi dati includono informazioni sulle caratteristiche uniche dell'occhio di ciascun individuo, come la forma e la riflettività della cornea, che sono fondamentali per una calibrazione accurata. I dati raccolti durante la calibrazione vengono analizzati in tempo reale dal sistema di HoloLens 2. Gli algoritmi di machine learning elaborano questi dati per creare un modello accurato del comportamento oculare dell'utente. Questo modello è poi utilizzato per mappare i movimenti degli occhi su coordinate spaziali precise all'interno dell'ambiente virtuale.

5.4.2 Architettura di rete client-server

Un'architettura di rete client-server è un modello di comunicazione che organizza i dispositivi informatici in due categorie principali: i client sono coloro che richiedono e utilizzano risorse o servizi, mentre i server sono responsabili di fornire tali risorse o servizi. Questo modello, schematizzato in Figura 38, è ampiamente utilizzato nelle reti informatiche per distribuire carichi di lavoro, gestire risorse e fornire accesso controllato alle informazioni. La comunicazione tra client e server avviene tramite protocolli di rete standard come HTTP, HTTPS, FTP, SMTP, etc. Quando un client invia una richiesta, questa viene elaborata dal server che, a sua volta, genera una risposta per il client. Questo ciclo di comunicazione è essenziale per la trasmissione di dati e l'esecuzione di operazioni complesse attraverso la rete.

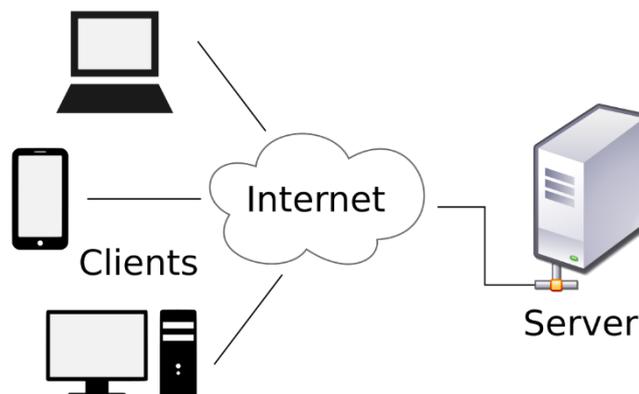


Figura 38 Architettura di rete client-server [72]

5.4.3 Riptide Networking

Riptide Networking è una libreria di rete progettata per facilitare la comunicazione tra applicazioni distribuite. Offre un'interfaccia semplice e intuitiva per l'invio e la ricezione di messaggi, supportando la gestione di connessioni affidabili e veloci. La libreria si basa su protocolli di comunicazione efficienti che riducono la latenza e migliorano la velocità di trasmissione dei dati. Un messaggio, nel contesto delle comunicazioni di rete, è una struttura di dati che contiene informazioni specifiche che devono essere trasmesse da un punto (ad esempio, un server) a un altro (ad esempio, un client). I messaggi possono variare in complessità e contenere diversi tipi di informazioni, a seconda delle necessità dell'applicazione. Un messaggio è generalmente composto da due parti fondamentali:

1. **Header (Intestazione):** Include metadati essenziali, come l'indirizzo di destinazione, l'indirizzo del mittente, il tipo di messaggio e altre informazioni necessarie per il corretto instradamento e gestione del messaggio.
2. **Payload (Carico Utile):** Contiene i dati effettivi che devono essere trasmessi. Nel caso dell'applicazione HoloLens 2, il payload potrebbe includere informazioni sulle posizioni tridimensionali dei target, il loro colore, la loro dimensione e il dwell time.

La libreria Riptide Networking gestisce i messaggi attraverso un sistema di serializzazione e deserializzazione ottimizzato, che consente di convertire oggetti complessi in flussi di byte e viceversa. Questo processo garantisce che i dati trasmessi siano compatti e facilmente interpretabili dal destinatario. La libreria supporta vari tipi di messaggi, inclusi:

- **Messaggi di Comando:** Utilizzati per inviare istruzioni specifiche dal server al client e viceversa.
- **Messaggi di Stato:** Contengono aggiornamenti sullo stato attuale del sistema.
- **Messaggi di Controllo:** Gestiscono la sincronizzazione e l'integrità della connessione, assicurando che il flusso di dati sia costante e privo di errori.

L'implementazione di un'architettura client-server nell'applicazione HoloLens 2, sfruttando la libreria Riptide Networking, ha rappresentato un elemento cruciale per il successo del progetto. Questa soluzione ha consentito una gestione efficiente e robusta della trasmissione dei dati tra il server, che gestisce la logica e la sincronizzazione dei target nella scena, e il client, che si occupa dell'interazione utente. L'adozione della libreria Riptide Networking ha significativamente ridotto la presenza di errori e ha garantito la stabilità del sistema. Questo miglioramento ha influito positivamente sulle performance e sull'affidabilità complessiva dell'applicazione, assicurando un'esperienza utente ottimale e priva di interruzioni.

5.4.4 Server

L'applicazione HoloLens 2, operante su piattaforma Windows, svolge il ruolo di server all'interno di un'architettura client-server. Il server ha la responsabilità di generare e trasmettere messaggi di rete contenenti informazioni dettagliate sui target presenti nella scena di realtà aumentata. Tali informazioni includono il numero di target, le loro posizioni tridimensionali (coordinate x, y, z), il colore, e la dimensione (scala) di ciascun target. Inoltre, il server invia un messaggio specifico contenente il dwell time.

Ogni target nell'applicazione è associato a un indice univoco che consente di identificarlo in modo inequivocabile nel sistema. Questo indice è utilizzato per gestire le interazioni dell'utente con il target e per modificare le sue proprietà durante l'uso dell'applicazione.

Nel contesto di target statici, ovvero target le cui caratteristiche e posizioni non variano nel tempo, il server invia al client un singolo messaggio di rete. Questo messaggio comprende tutti i dati necessari per la rappresentazione dei target, poiché non è richiesto alcun aggiornamento successivo. La trasmissione unica è sufficiente a garantire che il client disponga di tutte le informazioni per la visualizzazione corretta e completa della scena.

Nel caso di target dinamici, ovvero target che sono in movimento o le cui caratteristiche variano nel tempo, il server adotta una strategia di aggiornamento continuo. In questo scenario, vengono inviati al client circa 20 messaggi al secondo (20 fps), ciascuno contenente gli aggiornamenti necessari per riflettere le nuove posizioni e altre caratteristiche dei target. Questo approccio garantisce che il client mantenga una rappresentazione accurata e aggiornata della scena, consentendo una visualizzazione fluida e realistica dei target in movimento. L'invio dei messaggi è stato limitato a 20 fps per evitare problemi di stabilità del dispositivo HoloLens 2. Durante lo sviluppo e i test, è stato osservato che una frequenza di aggiornamento più alta poteva causare crash dell'applicazione o surriscaldamento del dispositivo. Pertanto, la limitazione rappresenta un compromesso ottimale tra reattività del sistema e stabilità operativa del dispositivo.

5.4.5 Client

L'applicazione client operante sul dispositivo HoloLens 2 si focalizza principalmente sulla ricezione di dati critici dal server e la gestione delle interazioni utente con i target presenti nell'ambiente di realtà aumentata, utilizzando l'eye-tracking del dispositivo per rilevare il punto su cui l'utente focalizza il suo sguardo. Il client, una volta connesso al server attraverso la libreria Riptide Networking, riceve messaggi contenenti informazioni dettagliate sui target presenti nella scena di realtà aumentata, incluse posizioni tridimensionali, colore, dimensione e il dwell time associato a ciascun target. Ogni target è dotato di un collider, un componente che definisce l'area di rilevamento attorno al target stesso. Quando lo sguardo dell'utente interseca il collider di un target, viene avviato un timer configurato con il dwell time ricevuto dal server. Se l'utente mantiene il proprio sguardo focalizzato sul target per almeno il periodo di dwell time, il client crea automaticamente un messaggio contenente l'indice del target selezionato e lo invia al server tramite la connessione stabilita con Riptide Networking. Il client, una volta inviato il messaggio di selezione al server, si affida a quest'ultimo per eseguire tutte le operazioni e la logica necessarie sul target selezionato. Questo include l'attivazione di eventi, la gestione di feedback visivi, o qualsiasi altra azione specifica determinata dalle caratteristiche e dalla logica dell'applicazione. Questo sistema avanzato assicura che le azioni dell'utente siano immediatamente riconosciute e trasformate in messaggi significativi inviati al server, contribuendo così a un'esperienza d'uso fluida e intuitiva.

5.4.6 Architettura del sistema

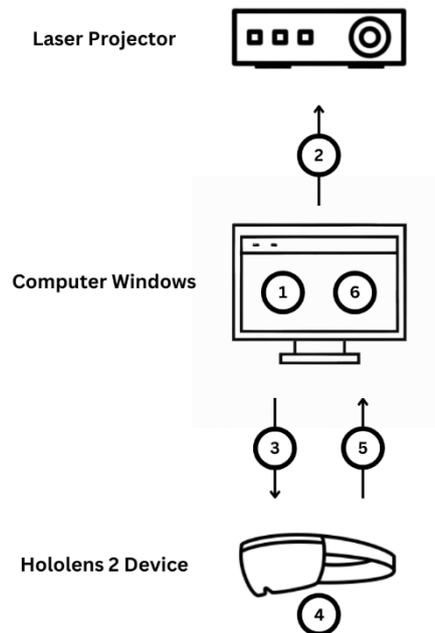


Figura 39 Architettura del sistema Proiettore-Computer-HoloLens2

Nella Figura 39 è mostrato il diagramma dell'architettura del sistema, sintetizzato nelle seguenti sei fasi principali:

1. **Inizializzazione del Sistema:** L'applicazione Unity viene avviata su un computer con sistema operativo Windows, assumendo il ruolo di server per la gestione delle operazioni.
2. **Proiezione dell'Interfaccia Utente:** L'interfaccia utente dell'applicazione viene proiettata nell'area di lavoro designata, consentendo agli utenti di interagire visivamente con il sistema.
3. **Trasmissione dei Dati dei target:** Un messaggio contenente tutte le informazioni e le specifiche relative ai target viene inviato al client, includendo dettagli essenziali per la configurazione.
4. **Configurazione dei target AR:** Il client riceve il messaggio e procede a configurare i target dell'applicazione AR in base ai dati trasmessi dal server, assicurando un'adeguata sincronizzazione.
5. **Selezione del target tramite eye-tracking:** Quando l'utente seleziona un target utilizzando la tecnologia di eye-tracking, il sistema invia un messaggio al server contenente l'indice del target selezionato, per un'elaborazione successiva.
6. **Elaborazione del target Selezionato:** Il server riceve l'indice del target e compie tutte le operazioni necessarie su quest'ultimo, eseguendo le azioni previste in risposta alla selezione effettuata dall'utente.

5.4.7 Diagramma di flusso selezione target con HoloLens 2

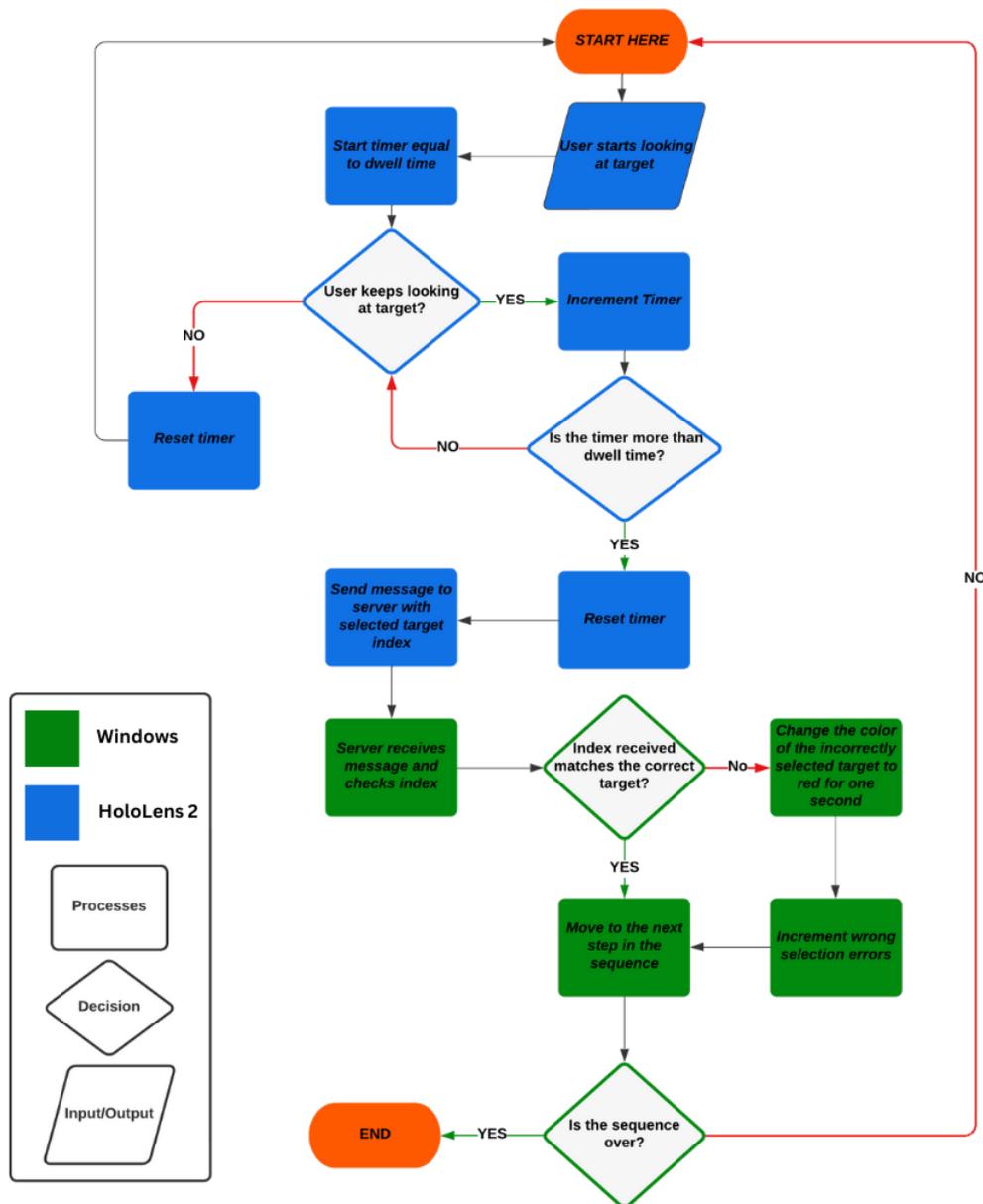


Figura 40 Diagramma di flusso selezione target con HoloLens 2

Nel diagramma di flusso descritto in Figura 40, il processo inizia quando l'utente inizia a guardare il target. Questo evento avvia un timer, inizializzato a un valore pari al dwell time ricevuto all'avvio del test. Durante l'osservazione del target da parte dell'utente, il valore del timer viene incrementato continuamente. Se l'utente smette di guardare il target, il valore viene resettato. Il sistema verifica costantemente se il valore del timer supera il valore del dwell time. In caso affermativo, viene inviato un messaggio al server contenente l'indice del target selezionato. Il server riceve l'indice e un metodo specifico verifica se l'indice ricevuto corrisponde al target corretto nella sequenza. Se la corrispondenza è corretta, il sistema procede allo step successivo della sequenza. Se l'indice non corrisponde, viene attivato un timer di 1 secondo, il target selezionato erroneamente si illumina di rosso fino allo scadere del timer, e viene incrementato un contatore che registra gli errori di selezione. Successivamente, il sistema procede comunque allo step successivo della sequenza. Alla fine di ogni step, viene verificato se la sequenza è completata. Se la sequenza è giunta al termine, il processo di selezione si conclude. In caso contrario, il sistema ritorna in attesa che l'utente inizi nuovamente a guardare un target, riprendendo così il ciclo descritto.

Capitolo 6

Test e risultati

Con lo scopo di effettuare il confronto delle prestazioni delle interfacce basate su eye-tracking e BCI sono stati condotti dei test al fine di valutare l'accuratezza, la velocità e la facilità d'uso di entrambe le tecnologie.

6.1 Test

Per effettuare il confronto tra le due interfacce, abbiamo deciso di realizzare test paragonabili tra loro. Poiché il tempo di selezione (dwell time) su HoloLens 2 può essere impostato via codice, mentre su NextMind non è modificabile a causa degli algoritmi proprietari, è stato necessario determinare il tempo di selezione medio di NextMind. In dettaglio, in uno studio precedente [63], sono stati condotti due esperimenti, nel primo appariva un singolo NeuroTag, mentre nel secondo apparivano nove NeuroTag simultaneamente disposti in un layout circolare. Come risultato dello studio è stato dimostrato che il tempo di attivazione mediano complessivo con il dispositivo NextMind è di 2,35 secondi. A una distanza di 50 cm tra occhio e schermo, la media ottenuta è stata di 2552ms e 2445ms per gli stimoli degli esperimenti 1 e 2, rispettivamente. A una distanza di 20 cm, i tempi sono stati di 2493ms e 2437ms. Alla luce di questi risultati, è stato deciso di utilizzare 2,5 secondi come tempo di selezione per HoloLens 2 per eseguire il confronto con NextMind. Questa scelta è giustificata dal fatto che 2,5 secondi rappresentano una media adeguata e realistica, che tiene conto dei tempi di attivazione osservati nello studio precedente, consentendo un confronto equilibrato tra le due tecnologie.

Successivamente, è stato deciso di confrontare le due interfacce precedentemente indicate con un tempo di selezione di 2,5 secondi con un'interfaccia che presenta un tempo di selezione significativamente più rapido. Poiché il tempo di selezione su HoloLens 2 è configurabile, abbiamo utilizzato lo stesso dispositivo con un tempo di selezione di 0,3 secondi. Il tempo scelto è basato sullo studio [64], che utilizza un tempo di selezione di 0,3 secondi, ritenuto uno dei più praticabili in termini di velocità e margine di errore. Questo ulteriore confronto è stato introdotto per valutare l'efficacia e l'efficienza delle interfacce in condizioni di utilizzo più estreme, al fine di determinare se la riduzione del tempo di selezione influisce significativamente sulle prestazioni degli utenti e sull'accuratezza delle selezioni. Inoltre, questa analisi permette di esplorare i limiti delle capacità di risposta delle tecnologie utilizzate e di identificare potenziali miglioramenti per applicazioni future.

6.1.1 Procedura

I test sono stati effettuati su un gruppo campione di 24 utenti. Il campione era composto da 16 utenti di sesso maschile e 8 di sesso femminile, con un'età che varia tra i 23 e i 39 anni, un'età media calcolata di 27.92 anni e una varianza di 24.34. Nel grafico in Figura 41 viene illustrata la frequenza di età e sesso dei partecipanti. In rosso sono illustrati gli utenti di sesso femminile e in blu gli utenti di sesso maschile. I tester sono stati reclutati tramite mailing list dell'Università Tecnica di Vienna. Tutti i partecipanti al test erano volontari, non retribuiti in alcun modo. Sono stati informati della possibilità di interrompere il test in qualsiasi momento, revocando il consenso informato senza alcuna conseguenza. Il background dei partecipanti comprendeva principalmente studenti e dottorandi in ambito di informatica e ingegneria informatica, garantendo conoscenze adeguate all'esecuzione dei test richiesti. Tutti i test sono stati condotti in un ambiente in penombra in modo da favorire la visualizzazione degli elementi proiettati e migliorare l'esperienza dell'utente.

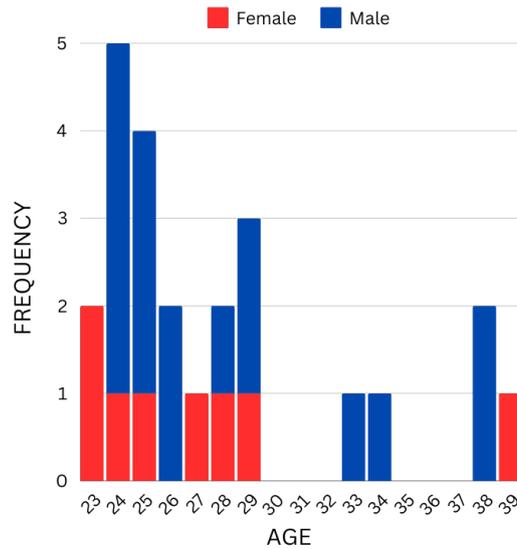


Figura 41 Grafico occorrenze età

6.1.2 Consenso informato e questionario iniziale

Prima di iniziare il test, ogni partecipante ha letto e firmato un modulo di consenso informato. Questo modulo serve a spiegare lo scopo dello studio, i potenziali rischi e benefici della partecipazione, e garantisce la riservatezza delle informazioni raccolte. Successivamente, è stato chiesto ai partecipanti di compilare un questionario iniziale. Questo questionario raccoglieva dati demografici (quali altezza ed età) e assegnava a ciascun partecipante un ID numerico univoco per garantire l'anonimato. Inoltre, il questionario includeva domande sulla conoscenza pregressa dei partecipanti riguardo le tecnologie BCI, eye-tracking e AR, nonché sulla presenza di eventuali problemi visivi. In Figura 42 sono riassunte le informazioni riguardanti i problemi visivi dei partecipanti.

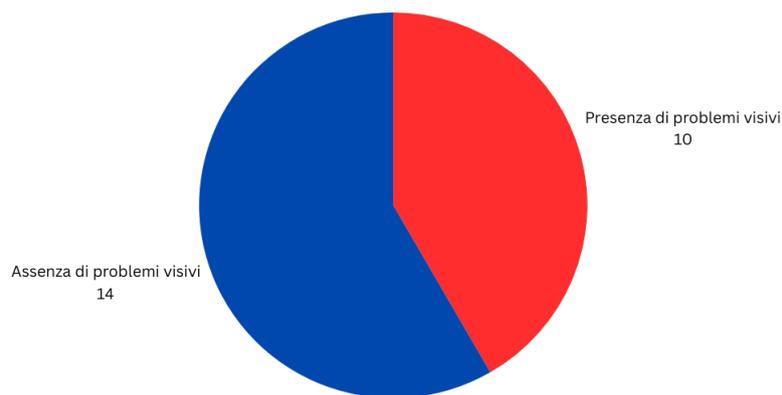


Figura 42 Rappresentazione grafica dei disturbi visivi riscontrati tra gli utenti.

La maggioranza dei partecipanti ha riferito di non avere conoscenze pregresse riguardo ai dispositivi NextMind e HoloLens 2, così come sull'uso della realtà aumentata, dichiarando un livello iniziale di familiarità con queste tecnologie. Le risposte al questionario riguardante le conoscenze pregresse sono riassunte nel grafico in Figura 43.

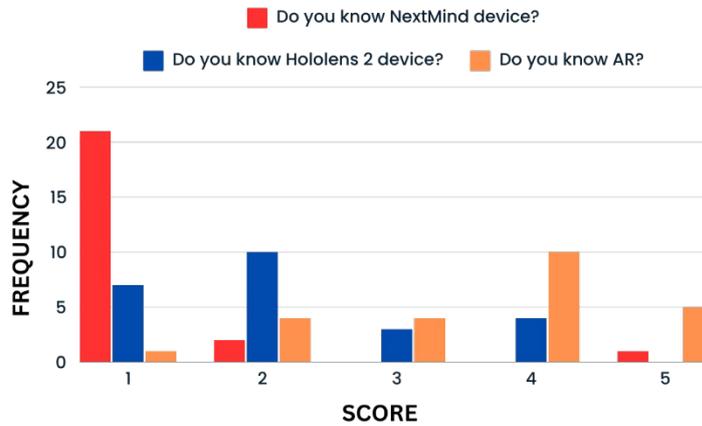


Figura 43 Diagramma riassuntivo delle risposte al questionario iniziale riguardante le conoscenze pregresse sulle tecnologie utilizzate.

6.1.3 Briefing iniziale

Dopo la compilazione del questionario, è stato mostrato ai partecipanti un riassunto dettagliato sugli obiettivi del progetto e sul funzionamento generale dei dispositivi utilizzati. Sono stati presentati esempi di target, e sono state fornite istruzioni su come interagire con questi utilizzando sia NextMind che HoloLens 2. A questo punto ha inizio la sessione di test, che prevede inizialmente la calibrazione dei dispositivi, successivamente, ogni partecipante completa una serie di task utilizzando entrambi i dispositivi, in sessioni separate. I risultati della calibrazione ottenuti con il dispositivo NextMind sono riassunti nel grafico in Figura 44.

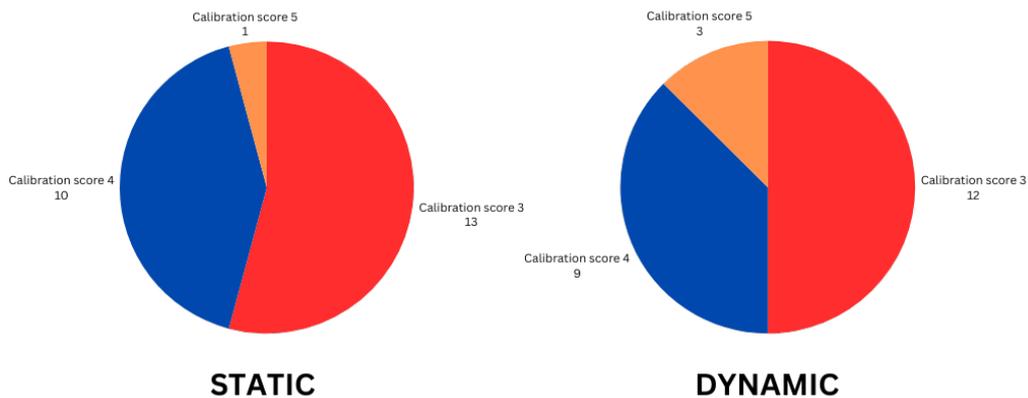


Figura 44 Grafico riassuntivo dei punteggi ottenuti durante la calibrazione di NextMind

6.1.4 Sessione di test

Il test si suddivide in due macro-categorie:

- **Test statici** prevedono l'interazione con target fissi, ovvero privi di movimento. Questi target mantengono una posizione costante durante tutto il periodo di selezione, consentendo di valutare la precisione e la velocità dell'utente in un contesto privo di movimenti.
- **Test dinamici**, invece, prevedono l'interazione con target mobili, che si spostano durante l'esecuzione del test. Questo scenario permette di analizzare le capacità degli utenti di seguire e selezionare target in movimento, simulando l'utilizzo in situazioni più complesse e realistiche.

Per ciascuna macro-categoria, sono stati eseguiti due task distinti:

- **Task senza Distrattori dove:** all'utente viene mostrato un singolo target da selezionare.
- **Task con Distrattori dove:** all'utente vengono mostrati numerosi target contemporaneamente, tutti di colore azzurro eccetto uno di colore bianco, che rappresenta il target corretto da selezionare.

Al termine di ogni task, ai partecipanti è stato chiesto di rispondere a tre domande utilizzando una scala di valutazione che va da -5 a 5, dove 0 rappresenta una valutazione neutra che non influisce sull'analisi statistica.

- **Q1** Quanto è stato facile questo metodo di puntamento e selezione? (-5 estremamente difficile, 5 estremamente facile)
- **Q2** Quanto siete d'accordo con l'affermazione: "Sono disposto a usare questo come metodo di puntamento e selezione in un sistema AR proiettato"? (-5 estremamente in disaccordo, 5 estremamente d'accordo)
- **Q3** Valutare lo sforzo percepito (tutte le sensazioni di stress fisico e affaticamento) per puntare e selezionare. (-5 massimo sforzo, 5 minimo sforzo)

Nel contesto statico, sono state esaminate due configurazioni differenti:

- **Croce:** con 9 target disposti a forma di croce.
- **Circolare:** con 8 target disposti lungo una circonferenza.

Nel contesto dinamico, sono state valutate tre velocità diverse:

V1: 4 cm/s: per valutare le prestazioni a bassa velocità.

V2: 8 cm/s: per valutare le prestazioni a velocità media.

V3: 12 cm/s: per valutare le prestazioni a velocità elevata.

A seguire, sono stati implementati tre tipi di movimento con un numero variabile di target:

- **Movimento a croce:** 4 target si muovono linearmente.
- **Movimento circolare:** 8 target si muovono in un moto circolare.
- **Movimento doppio circolare:** 10 target disposti su due circonferenze concentriche; la circonferenza esterna presenta 6 target e ruota in senso orario, mentre quella interna presenta 4 target e ruota in senso antiorario.

Ogni tipo di movimento è stato analizzato alle tre diverse velocità, ottenendo così 9 combinazioni differenti. Queste combinazioni sono state presentate agli utenti in modo completamente casuale per ridurre l'effetto di apprendimento. Per ciascun tipo di test, è stato impostato un timeout di selezione. Se l'utente non seleziona il target entro il tempo stabilito, si passa al target successivo e viene registrato un errore di timeout.

La definizione dei tempi di timeout è stata attentamente valutata attraverso numerose prove, per garantire un compromesso tra tempi troppo brevi, che potrebbero risultare non sufficienti, e tempi eccessivi, che potrebbero ridurre la sfida del compito. I tempi di timeout utilizzati per tipologia di test sono riassunti nella Tabella 3.

Tipo di Test	Velocità del Target	Tempo di Timeout
Statico	/	5s
Dinamico V1	4cm/s	6s
Dinamico V2	8cm/s	8s
Dinamico V3	12cm/s	10s

Tabella 3 Tabella riassuntiva dei tempi di timeout per tipologia di test

- **Test statici:** il tempo di timeout è minore rispetto ai test dinamici, basandosi sull'ipotesi che la selezione in un contesto statico è più semplice.
- **Test dinamici:** il tempo di timeout aumenta con la velocità dei target, basandosi sull'ipotesi che maggiore è la velocità, maggiore è la difficoltà di selezione.

Questa metodologia ha permesso di valutare in modo completo e rigoroso le prestazioni delle interfacce analizzate, sia in scenari statici che dinamici, offrendo un quadro chiaro delle capacità e delle limitazioni delle tecnologie di input utilizzate.

In Figura 45 è mostrata una partecipante durante il test dinamico in presenza di distrattori effettuato con il dispositivo HoloLens 2.

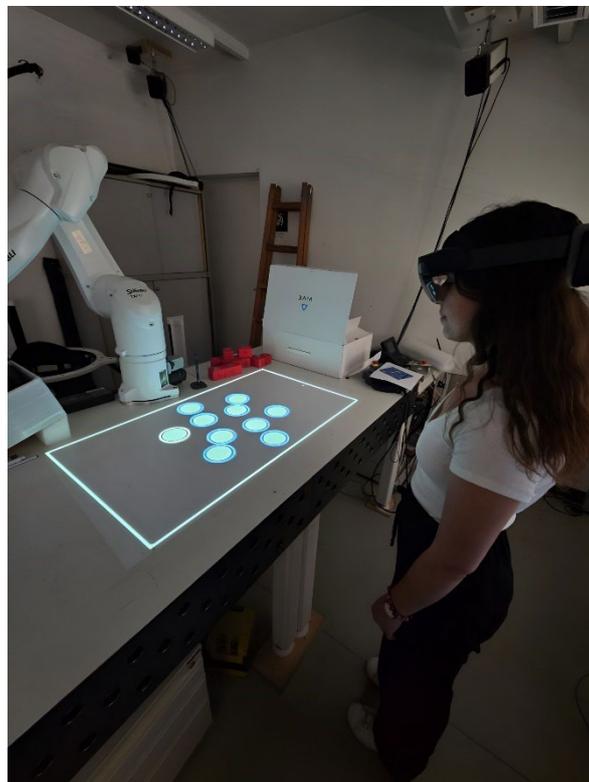


Figura 45 Utente durante il test dinamico con distrattori usando HoloLens 2

Al termine di ogni macro-test, ai partecipanti è stato chiesto di compilare un ulteriore questionario per valutare le loro impressioni sui test ed anche di stilare una classifica delle tre interfacce (NextMind, HoloLens_0_3, HoloLens_2_5) in base alla loro preferenza. Questa metodologia di test è stata ideata per analizzare in dettaglio come gli utenti reagiscono alle diverse modalità di selezione dei target e per identificare quale tecnologia offre la migliore esperienza in termini di accuratezza, velocità di selezione, facilità d'uso e comfort.

La scelta dei colori da utilizzare per identificare i target è stata attentamente ponderata per garantire l'efficacia dei test. Per il target corretto da selezionare, è stato utilizzato il colore bianco, in linea con quanto fatto nello studio di riferimento [53], che funge da base di partenza per i test di questo progetto di ricerca. Per quanto riguarda i distrattori, è stato selezionato un colore che, pur mantenendo una somiglianza con il bianco, non fosse eccessivamente simile. L'obiettivo è aumentare la difficoltà della selezione per gli utenti, costringendoli a prestare maggiore attenzione per notare le differenze tra i due colori, senza tuttavia renderla impossibile. La scelta è ricaduta sul colore "blue jeans, 00A8FF" che è stato utilizzato anche in un altro progetto citato in precedenza [10]. In questo studio, si afferma che "I colori scelti sono caratterizzati da una distanza spaziale considerevole con lo scopo di massimizzare il più possibile la differenza percettiva degli stessi e garantire un contrasto cromatico efficace".

Durante le prove svolte nella fase di sviluppo, il colore blue jeans si è rivelato efficace per raggiungere l'obiettivo proposto, permettendo una distinzione chiara tra l'elemento corretto da selezionare e i distrattori, senza rendere la selezione impossibile. Un esempio è rappresentato nella Figura 46. Questa scelta cromatica ha pertanto dimostrato di essere funzionale e in linea con l'obiettivo di garantire un livello di difficoltà adeguato nei test senza compromettere l'efficacia della selezione visiva da parte degli utenti.

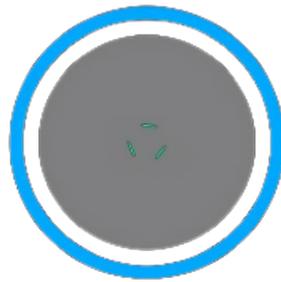


Figura 46 Esempio di target distrattore

In Figura 47 viene schematizzato il test statico nelle sue quattro configurazioni possibili.

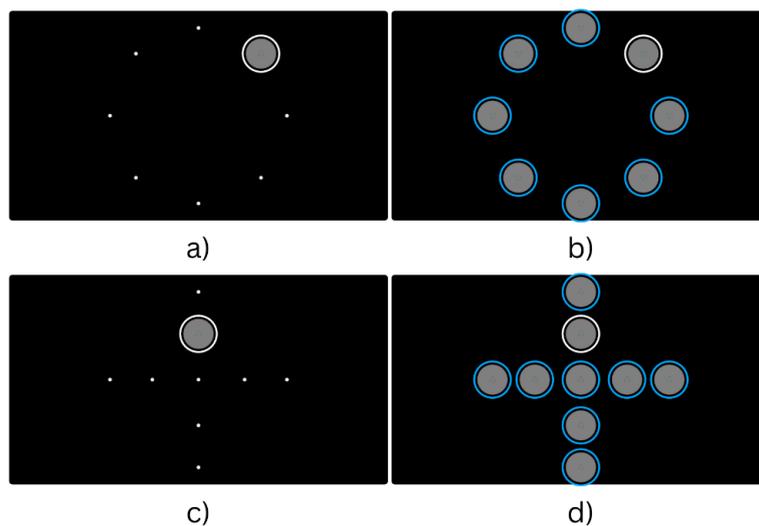


Figura 47 a) Test statico circolare senza distrattori b) Test statico circolare con distrattori
c) Test statico croce senza distrattori d) Test statico croce con distrattori

6.1.5 Metodologia Latin Square

Per garantire che i test con gli utenti fossero il più casuali possibile e per ridurre al minimo gli effetti di apprendimento (learnability), è stata utilizzata la metodologia Latin Square. La metodologia Latin Square è una tecnica statistica che consente di gestire e controllare le possibili fonti di variabilità in un esperimento o uno studio. Si basa sul fatto che le condizioni sperimentali sono organizzate in modo sistematico in una matrice quadrata, con ogni condizione sperimentale visualizzata una volta in ogni riga e una volta in ogni colonna. Questo schema garantisce che ciascuna condizione sia valutata in combinazione con tutte le altre, riducendo al minimo il potenziale bias dovuto alla sequenzialità o all'ordine delle condizioni. In particolare, come rappresentato in Tabella 4, è stato impiegato un Latin Square di dimensione 6, ovvero una matrice 6x6, per organizzare l'ordine di esecuzione dei task tra i diversi partecipanti, assicurando che ciascuna condizione fosse verificata in ogni posizione sequenziale una volta sola. Ad ogni interfaccia e tipo di task eseguito è stata assegnata una lettera per identificare il gruppo, come segue:

- A: NextMind senza distrattori
- B: NextMind con distrattori
- C: HoloLens 2 selezione lenta senza distrattori
- D: HoloLens 2 selezione lenta con distrattori
- E: HoloLens 2 selezione veloce senza distrattori
- F: HoloLens 2 selezione veloce con distrattori

A	B	F	C	E	D
B	C	A	D	F	E
C	D	B	E	A	F
D	E	C	F	B	A
E	F	D	A	C	B
F	A	E	B	D	C

Tabella 4 Latin Square utilizzato per i test

Questo approccio ha permesso di distribuire equamente qualsiasi potenziale bias di sequenza tra i partecipanti, garantendo che i risultati riflettessero accuratamente le performance relative alle diverse interfacce e condizioni, piuttosto che l'ordine in cui i task sono stati eseguiti. Nel diagramma di flusso mostrato in Figura 48, viene illustrata la struttura dei test relativa alla prima colonna del Latin Square utilizzato.

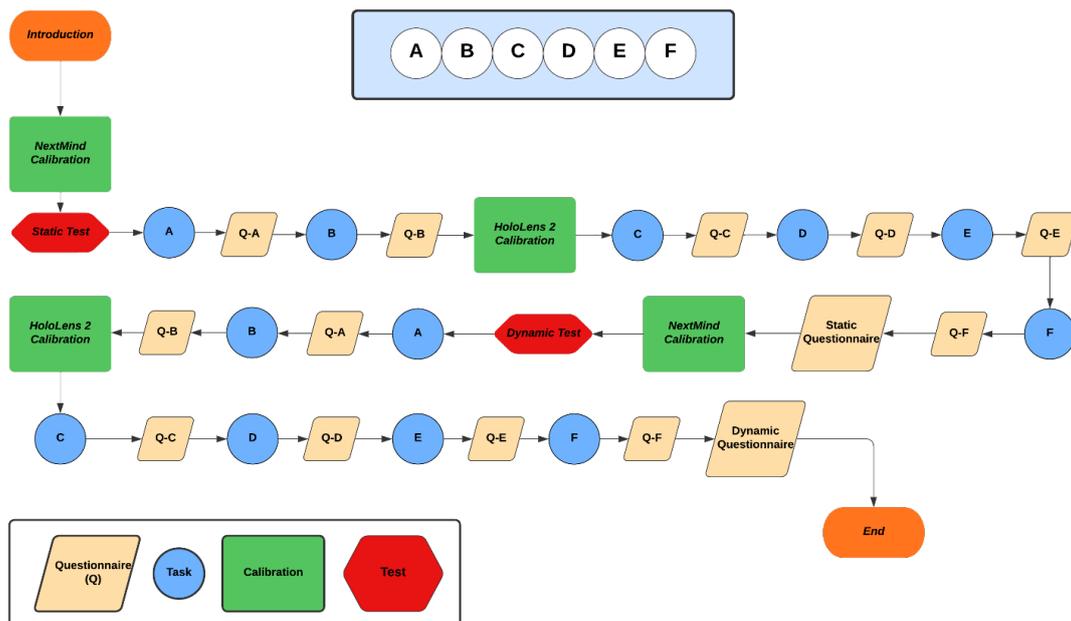


Figura 48 Diagramma esemplificativo della struttura del test relativa alla prima colonna del Latin Square.

6.2 Risultati

I dati raccolti durante i test sono stati successivamente analizzati per valutare l'usabilità del sistema e per evidenziare eventuali differenze tra l'interfaccia eye-tracking e la BCI, sia in contesti statici che dinamici, tenendo in considerazione anche le prestazioni in presenza e in assenza di distrattori. I risultati ottenuti offrono una panoramica dettagliata delle capacità e delle limitazioni di ciascuna tecnologia, fornendo così indicazioni preziose per il miglioramento delle interfacce utente.

Per mostrare graficamente i dati, i risultati saranno rappresentati come box plot. Un box plot è un diagramma utilizzato per rappresentare la distribuzione di un insieme di dati e fornisce informazioni sulla variabilità, la mediana e gli outliers. Al centro del box plot si trova una scatola che evidenzia l'intervallo in cui è presente la maggior parte dei dati. All'interno della scatola, la linea mediana indica il valore centrale della distribuzione. Le linee che si estendono dalla scatola, mostrano la variabilità dei dati, estendendosi fino ai valori minimi e massimi. I dati che si trovano al di fuori di queste linee sono considerati outliers e vengono rappresentati come punti singoli al di fuori del range principale. In questo modo, il box plot fornisce una visione chiara della distribuzione dei dati, mettendo in evidenza la mediana, la dispersione e i valori anomali.

Per ciascun insieme di dati, è stato inizialmente impiegato il test di Shapiro-Wilk per verificare la normalità, questo test è particolarmente indicato per campioni di piccole dimensioni. Se il valore p è inferiore al livello alfa di 0,05, i dati avranno una distribuzione non-normale; viceversa, se il valore di p è superiore, non ci saranno prove sufficienti per affermare che i dati deviano da una distribuzione normale. I dati relativi alla selezione di ciascun target sono stati analizzati considerando il tempo totale impiegato, il numero totale di errori di timeout e il numero di selezioni errate. Tutti i risultati ottenuti presentano una distribuzione non-normale ($p < 0.05$), pertanto è stato impiegato il test non-parametrico Aligned Rank Transform (ART) [65] per valutare gli effetti delle variabili indipendenti Gruppo, Distrattori e Velocità sulle variabili dipendenti misurate. In presenza di effetti statisticamente significativi, sono stati condotti test di contrasto come analisi *post-hoc*, in accordo con la metodologia utilizzata in precedenti studi [66].

Il test ART è stato scelto per la sua capacità di trasformare i dati non-normali in modo che possano essere analizzati utilizzando modelli lineari additivi, permettendo così una valutazione robusta degli effetti e delle interazioni. I test di contrasto hanno consentito di identificare le differenze specifiche tra i livelli delle variabili indipendenti, fornendo una comprensione più dettagliata dei dati. Essendo questa un'analisi preliminare, l'attenzione si è focalizzata sugli effetti individuali delle variabili indipendenti, nonché sulla loro interazione, per identificare pattern significativi che giustifichino ulteriori ricerche e approfondimenti.

6.2.1 Test Statico

Il box plot illustrato in Figura 49 rappresenta il tempo totale impiegato ad effettuare il test statico per le tre interfacce prese in esame e indicate come Gruppo: HoloLens_0_3, HoloLens_2_5 e NextMindTest.

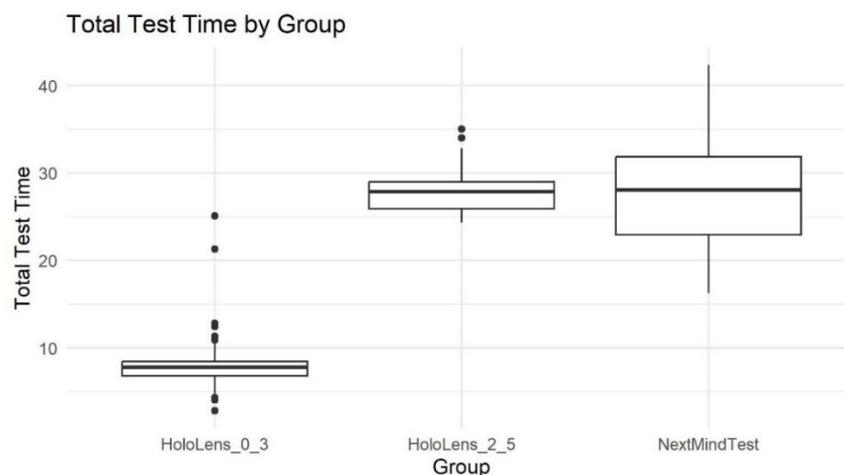


Figura 49 Tempo totale del test statico in relazione al gruppo

Considerando la variabile “tempo totale di test”, il test statistico mostra che ci sono differenze significative tra tutte e tre le interfacce. Per il gruppo HoloLens_0_3, la mediana del tempo di test è di 8 secondi. C'è una variabilità ridotta, e sono presenti alcuni outliers. Per quanto riguarda il gruppo HoloLens_2_5, la mediana del tempo di test è 28 secondi. Anche in questo caso la variabilità è ridotta, e sono presenti outliers. Infine, il gruppo NextMind mostra una mediana del tempo di test di 28 secondi. Non sono presenti outliers, ma presenta una maggiore variabilità dei tempi del test che si attesta tra i 23 e i 32 secondi. Come descritto precedentemente, il tempo totale di selezione per HoloLens_0_3 è il più rapido. Per quanto riguarda HoloLens_2_5 e NextMind invece, il tempo totale di selezione è simile, ma NextMind mostra una maggiore variabilità rispetto a HoloLens_2_5.

In Figura 50, viene considerata la variabile dipendente “errore di timeout”, l'analisi statistica mostra che ci sono differenze significative tra HoloLens_0_3-NextMind e HoloLens_2_5-NextMind. La mediana di HoloLens_0_3 e HoloLens_2_5 è la stessa e per entrambi i casi è pari a 0, con la presenza di alcuni outliers. Per quanto riguarda NextMind, la mediana è pari a 1 con un'elevata variabilità e la presenza di outliers. Prendendo in esame i precedenti grafici riguardanti il test statico, possiamo concludere che HoloLens_0_3 ha il tempo di selezione più veloce, HoloLens_2_5 presenta una minore variabilità e un numero minore di errori di timeout rispetto al NextMind, che invece presenta una maggiore distribuzione sia nel tempo di selezione che nel numero di errori di timeout. Questi risultati forniscono informazioni utili per dare una risposta alla domanda **R1**.

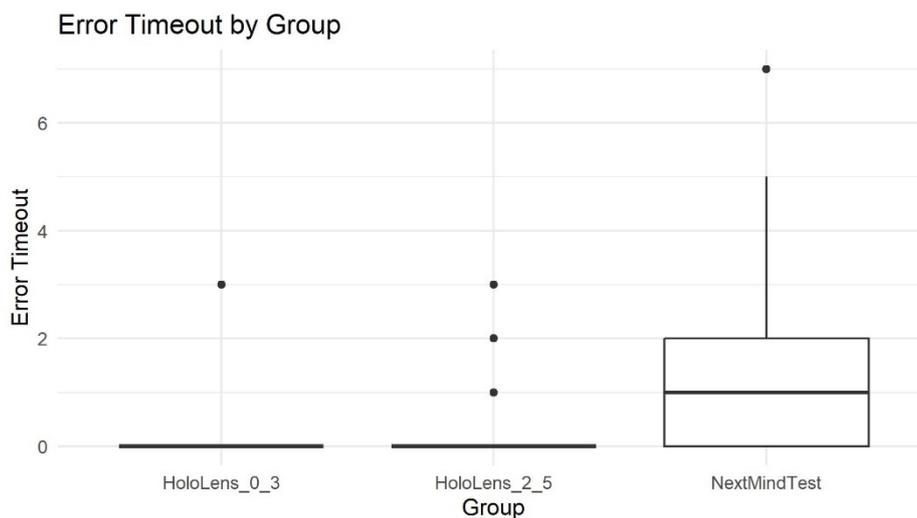


Figura 50 Errore di timeout nel test statico in relazione al gruppo

La Figura 51 mostra un'analisi comparativa del tempo totale nel test statico, distinto nelle due condizioni sperimentali: in assenza di distrattori e in presenza di distrattori. Considerando la variabile dipendente “tempo totale di test”, i risultati dell'analisi statistica mostrano che ci sono differenze significative tra l'assenza e la presenza di distrattori. Complessivamente, è stato osservato che le tre interfacce in esame mostrano un tempo totale di test inferiore in presenza di distrattori, suggerendo un impatto positivo dei distrattori sulle prestazioni delle interfacce.

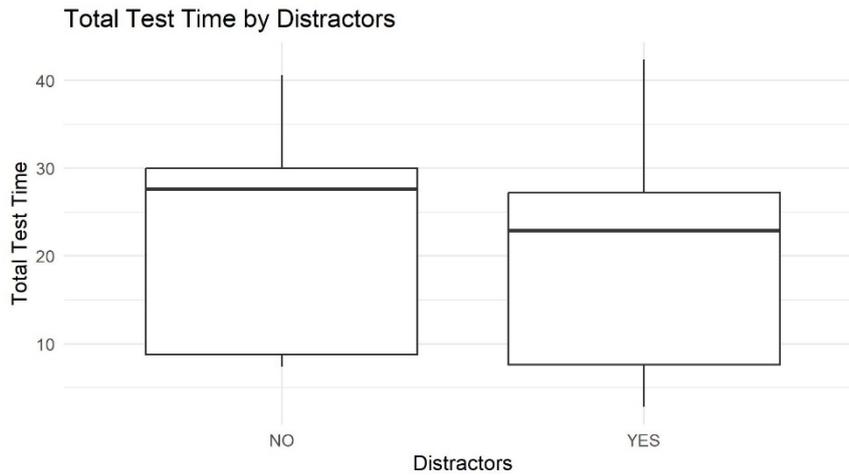


Figura 51 Tempo totale del test statico in assenza (NO) e in presenza di distrattori (YES)

Nella Figura 52 sono rappresentati i risultati dettagliati del test statico eseguito con le tre interfacce esaminate, distinguendo tra assenza e presenza di distrattori. I primi tre box plot rappresentano la condizione in assenza di distrattori (NO), mentre i successivi tre riguardano la condizione con distrattori (YES). Questa visualizzazione permette di esaminare in modo semplice come la presenza di distrattori influenzi le prestazioni misurate per ogni interfaccia presa in esame. Considerando la variabile “tempo totale di test”, l’analisi dell’interazione Gruppo:Distrattori mostra che ci sono differenze significative per tutte le interazioni. Come si evince dal grafico, il tempo totale di test mediano di HoloLens_0_3 è significativamente inferiore rispetto a quello di HoloLens_2_5 e NextMind. Nella condizione senza distrattori, NextMind mostra i tempi totali di test più lunghi. Con l’aggiunta dei distrattori, si osserva una differenza significativa tra HoloLens_2_5 e NextMind. Inaspettatamente, rispetto alla situazione senza distrattori, NextMind presenta un tempo totale di test significativamente inferiore rispetto ad HoloLens_2_5. Questi risultati indicano che in presenza di distrattori, NextMind ha tempi di risposta più veloci, dimostrando una migliore capacità di gestire situazioni complesse.

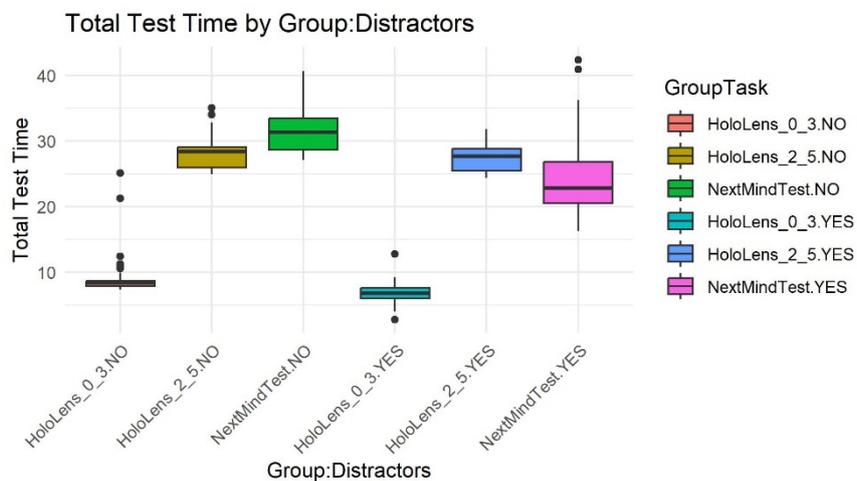


Figura 52 Tempo totale del test statico in relazione al gruppo e alla presenza di distrattori

Nel contesto dell’analisi della variabile dipendente “errore di selezione non corretta”, i test statistici mostrano che l’interazione Gruppo:Distrattori presenta differenze significative per tutte le interazioni. Nel grafico in Figura 53 si può osservare che, come atteso, a causa della sua elevata velocità di selezione, HoloLens_0_3 presenta un numero significativo di errori rispetto a HoloLens_2_5 e NextMind.

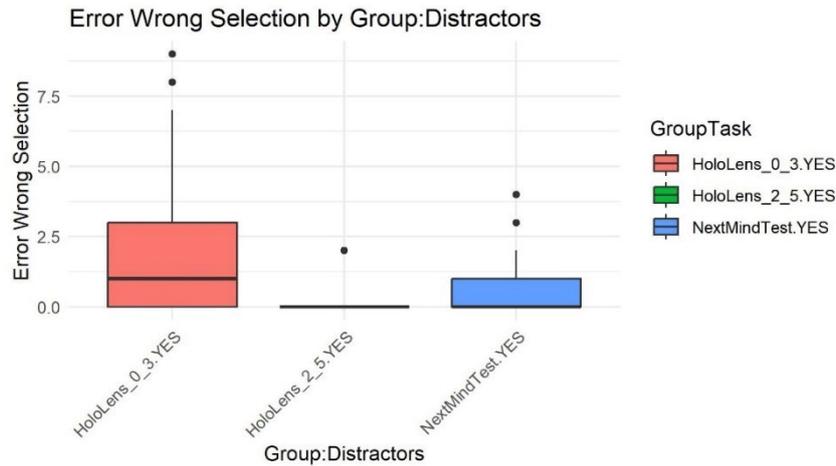


Figura 53 Errore di selezione non corretta in relazione al gruppo e distrattori

6.2.2 Test Dinamico

Il box plot in Figura 54 rappresenta il tempo totale impiegato ad effettuare il test dinamico suddiviso per le tre interfacce: HoloLens_0_3, HoloLens_2_5 e NextMind.

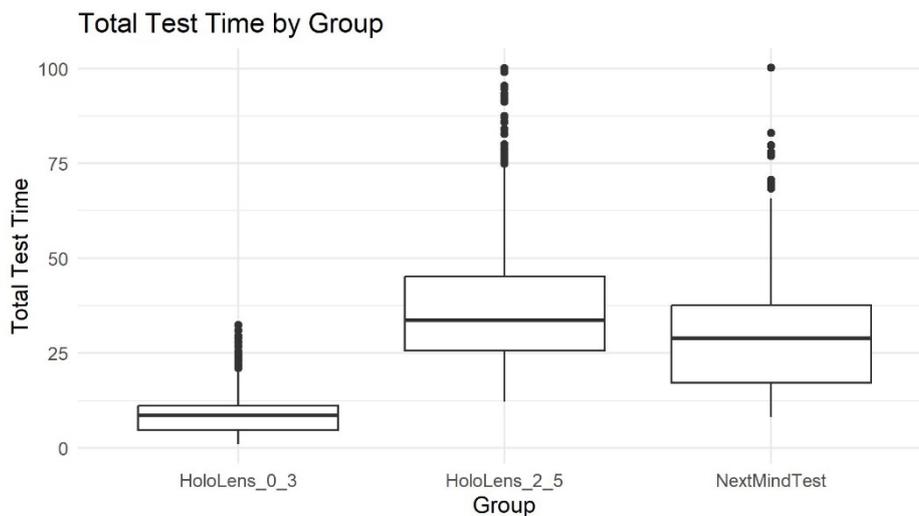


Figura 54 Tempo totale del test dinamico in relazione al gruppo

Considerando la variabile “tempo totale di test”, l’analisi mostra che ci sono differenze statisticamente significative tra tutte e tre le interfacce. Dal grafico si evince che il gruppo HoloLens_0_3 presenta una mediana che si attesta a circa 11 secondi con una variabilità ridotta e presenza di diversi outliers. Per quanto riguarda il gruppo HoloLens_2_5, la mediana del tempo di test è di circa 35 secondi. In questo caso la variabilità è elevata compresa tra i 25 e i 45 secondi, e sono presenti numerosi outliers. Infine, il gruppo NextMind mostra una mediana del tempo di test di circa 30 secondi con una elevata variabilità dei tempi del test che si attesta tra i 15 e i 37 secondi, con numerosi outliers. Come previsto, il tempo totale di selezione per HoloLens_0_3 è anche in questo caso il più rapido. Per quanto riguarda HoloLens_2_5 e NextMind invece, il tempo totale di selezione è risultato inferiore nei test effettuati con NextMind, ma entrambe le interfacce presentano una elevata variabilità e numerosi outliers.

Con riferimento alla Figura 55, considerando la variabile dipendente “errore di timeout”, l’analisi statistica mostra differenze significative tra tutte le interfacce. La mediana per ciascuna interfaccia risulta essere pari a 0. HoloLens_0_3 mostra una variabilità trascurabile, mentre HoloLens_2_5 evidenzia un’elevata variabilità accompagnata da numerosi outlier, caratteristica che si osserva anche nel caso del NextMind. I risultati indicano che, per il test dinamico, HoloLens_0_3 ha il tempo di selezione più veloce e un numero limitato di errori di timeout, HoloLens_2_5 mostra un tempo di selezione più elevato e un numero maggiore di errori di timeout rispetto ai test condotti con NextMind. Complessivamente i risultati ottenuti forniscono una risposta alla domanda **R2**.

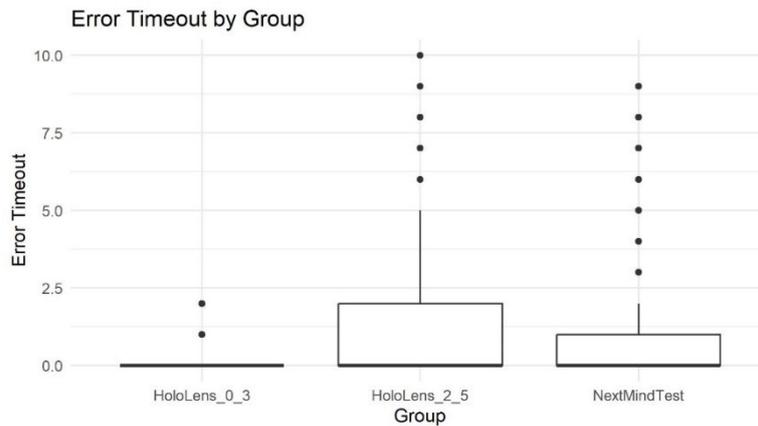


Figura 55 Errore di timeout nel test dinamico in relazione al gruppo

La Figura 56 presenta un’analisi comparativa del tempo totale del test dinamico, distinto nelle due condizioni sperimentali: in assenza di distrattori e in presenza di distrattori. Considerando la variabile dipendente “tempo totale di test”, l’analisi mostra differenze significative tra l’assenza e la presenza di distrattori. Anche nel caso dinamico, complessivamente, le tre interfacce in esame mostrano un tempo totale di test inferiore in presenza di distrattori, suggerendo che la presenza di distrattori influisce significativamente sulla selezione di target anche nel contesto dinamico.

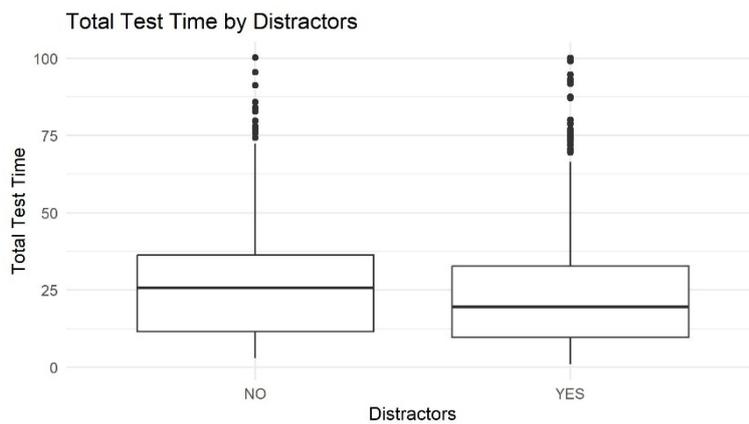


Figura 56 Tempo totale del test dinamico in assenza (NO) e in presenza di distrattori (YES)

Nella Figura 57 sono rappresentati i risultati dettagliati del test dinamico eseguito con le tre interfacce esaminate, distinguendo tra assenza e presenza di distrattori. Considerando la variabile “tempo totale di test”, l’analisi dell’interazione Gruppo:Distrattori presenta differenze significative per tutte le interazioni. Come si evince dal grafico, il tempo totale di test mediano di HoloLens_0_3 è significativamente inferiore rispetto a quello di HoloLens_2_5 e NextMind. Nella condizione senza distrattori, HoloLens_2_5 mostra i tempi totali di test maggiori. Con l’aggiunta di distrattori, si osserva una differenza significativa tra HoloLens_2_5 e NextMind. Rispetto alla situazione senza distrattori, HoloLens_2_5 presenta una variabilità maggiore, NextMind presenta invece un tempo totale di test significativamente inferiore rispetto ad HoloLens_2_5. Anche nel contesto dinamico, i risultati indicano che in presenza di distrattori, NextMind ha tempi di risposta più rapidi.

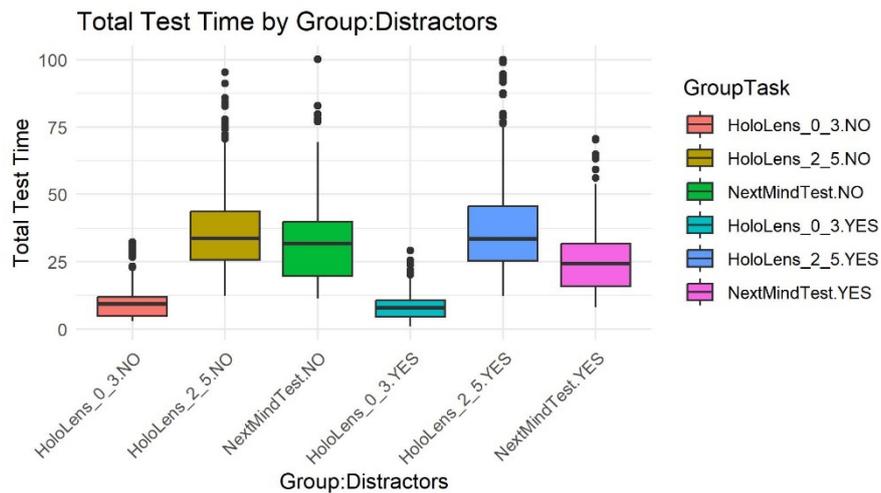


Figura 57 Tempo totale del test dinamico in relazione al gruppo e alla presenza di distrattori

Nell’analisi della variabile dipendente “errore di selezione non corretta”, i test statistici effettuati sull’interazione Gruppo:Distrattori presentano differenze significative per tutte le interazioni. Dal grafico rappresentato in Figura 58 si osserva che, anche nel caso dinamico, a causa della sua elevata velocità di selezione, HoloLens_0_3 presenta un significativo aumento del numero di errori e una elevata variabilità rispetto a HoloLens_2_5 e NextMind.

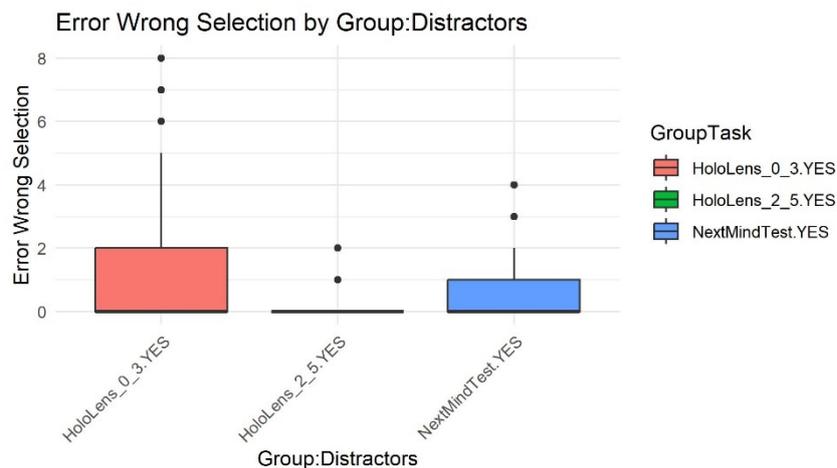


Figura 58 Errore di selezione non corretta in relazione al gruppo e alla presenza di distrattori

In sintesi, i risultati mostrano che la presenza di distrattori influisce significativamente sulle prestazioni delle interfacce, riducendo il tempo totale del test sia nei contesti statici che dinamici. Tuttavia, questa riduzione del tempo è accompagnata da un aumento degli errori di selezione non corretta. HoloLens_0_3 mostra tempi di esecuzione più brevi durante i test in entrambi i contesti, ma con un numero significativo di errori di selezione

non corretta, suggerendo che la velocità non sempre si traduce in precisione elevata. Questo è cruciale perché, nonostante la sua efficienza in termini di velocità di selezione, la precisione di HoloLens_0_3 è compromessa quando ci sono elementi che distraggono l'utente. Al contrario, NextMind presenta tempi di risposta più rapidi di HoloLens_2_5 in presenza di distrattori e mantiene anche un basso tasso di errori. Questo indica che NextMind è più capace di gestire situazioni complesse, assicurando sia velocità che precisione nella selezione del target. Grazie a questi risultati è possibile fornire una risposta alla domanda **R3**.

Per quanto riguarda l'analisi statistica relativa al tempo totale di test in funzione della velocità dei target, il grafico illustrato nella Figura 59 mostra che ci sono differenze significative per ogni velocità di task. Come ipotizzato, il tempo totale del test risulta essere direttamente proporzionale alla velocità dei target. Questo suggerisce che all'aumentare della velocità dei target, aumenta anche la difficoltà di selezione e di conseguenza anche il tempo totale necessario per completare il test.

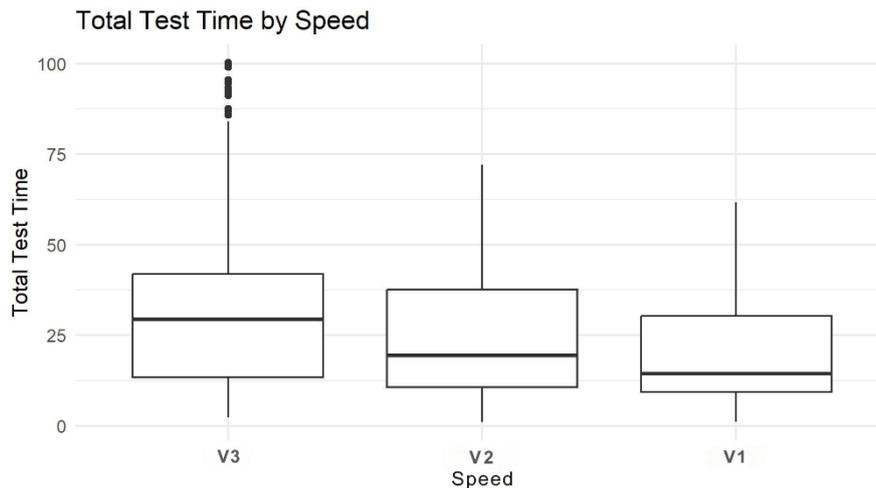


Figura 59 Tempo totale del test dinamico in relazione alla velocità dei target

Considerando invece la variabile dipendente “errore di timeout”, l’analisi mostra che ci sono differenze significative tra V3-V2 e V3-V1. Come si evince dalla Figura 60, ogni box plot presenta una mediana pari a 0, ma in particolare il caso V3 presenta una variabilità elevata. Questo indica che, nonostante la mediana sia simile tra le diverse velocità, la variabilità più elevata nel caso V3 potrebbe indicare una maggiore incertezza o difficoltà nella gestione dei target, soprattutto quando questi si muovono rapidamente.

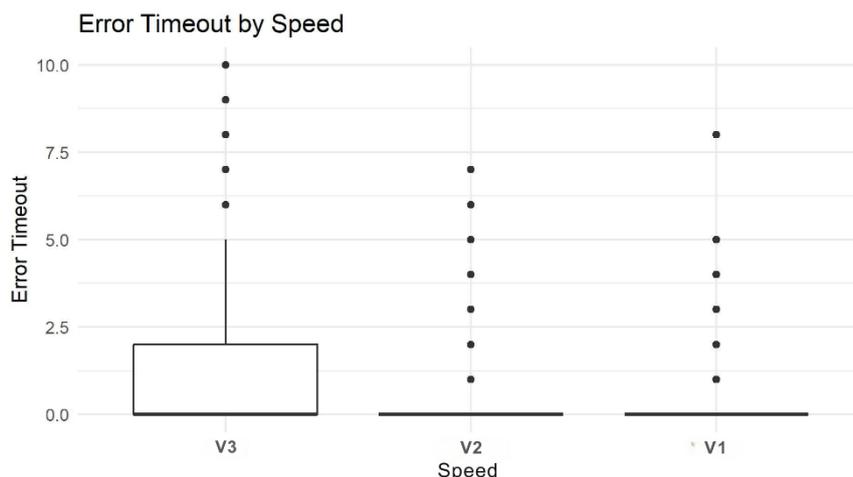


Figura 60 Errore di timeout in relazione alla velocità dei target

Dopo aver effettuato i test, gli utenti hanno risposto ad un ulteriore questionario. I dati provenienti dai questionari sono stati analizzati per comprendere meglio le preferenze degli utenti riguardo alle diverse interfacce provate. In Figura 61 vengono mostrati i risultati dell'analisi dei dati del questionario compilato al termine di ogni macro test, nel quale è stato chiesto agli utenti di stilare una classifica dell'interfaccia da loro

preferita. Questo feedback è stato raccolto sia al termine del test statico che del test dinamico, fornendo una panoramica completa delle preferenze degli utenti nelle due diverse condizioni operative. Le conclusioni che si possono trarre da questi dati indicano che HoloLens_0_3 sembra essere l'interfaccia preferita dagli utenti, sia in condizioni statiche che dinamiche, con il numero più alto di risposte positive. NextMind, invece, ha un numero di risposte inferiore rispetto a HoloLens_0_3 e HoloLens_2_5 in entrambe le condizioni, suggerendo che potrebbe essere percepita come meno efficace o meno confortevole. HoloLens_2_5 mostra una risposta costante tra condizioni statiche e dinamiche, il che potrebbe indicare una performance stabile indipendentemente dal contesto.

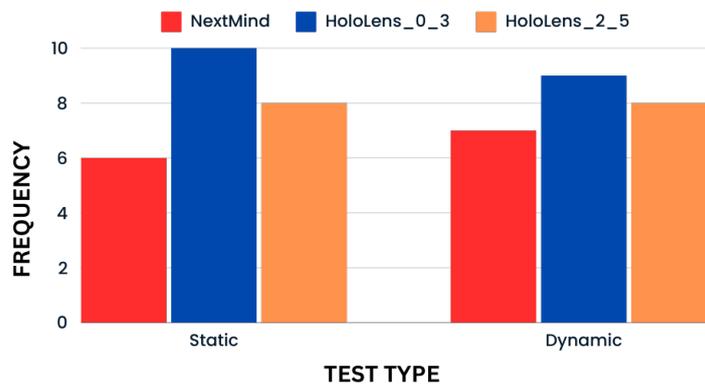


Figura 61 Grafico riassuntivo delle preferenze degli utenti in relazione alla tipologia di test

I grafici seguenti rappresentano le risposte medie degli utenti alle domande poste al termine di ogni task, suddivise per i gruppi A-F e per le tre domande (Q1, Q2, Q3). Il grafico in Figura 62 inerente al test in ambiente statico, suggerisce che in media i diversi metodi di puntamento e selezione sono percepiti come facili da usare. I gruppi C, D ed E sono quelli ritenuti più facili, mentre i gruppi A, B e F risultano quelli più complessi. Per quanto riguarda l'affaticamento che gioca un ruolo cruciale nella valutazione da parte degli utenti, i gruppi A e B risultano quelli più faticosi.

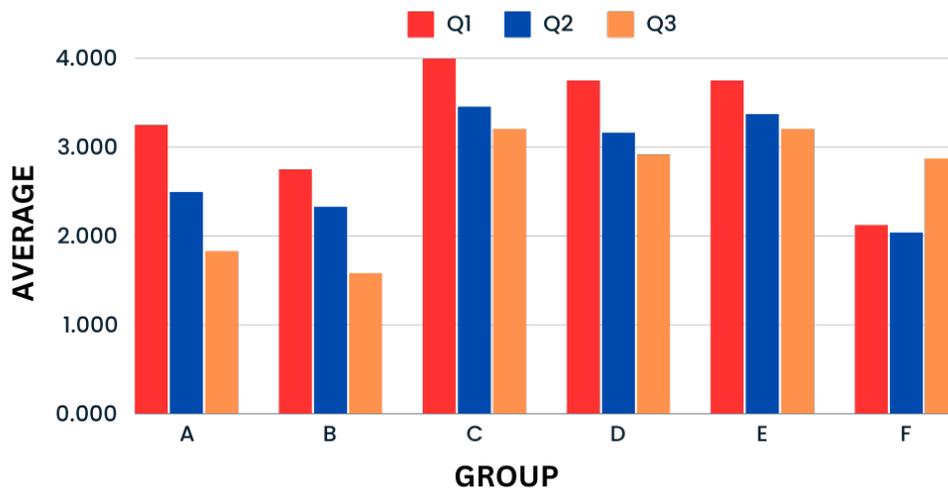


Figura 62 Risposte medie alle domande del test statico in relazione al gruppo

Nel contesto dinamico, rappresentato in Figura 63, invece i dati mostrano che la facilità percepita di un metodo di puntamento e selezione è significativamente inferiore. In particolare, i gruppi E ed F, sono quelli che meglio bilanciano questi fattori, risultando i preferiti dagli utenti, sia in termini di semplicità di utilizzo che di affaticamento. Al contrario, gli altri gruppi hanno riportato maggiori difficoltà, evidenziando una minore facilità d'uso e un notevole sforzo. L'analisi di questi risultati raccolti può portare ad ulteriori miglioramenti e ottimizzazioni delle interfacce in base alla percezione degli utenti.

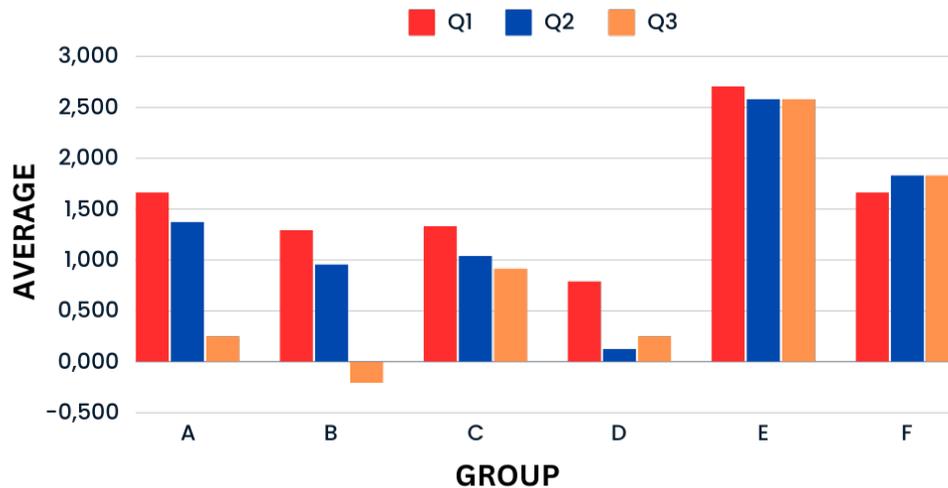


Figura 63 Risposte medie alle domande del test dinamico in relazione al gruppo

6.3 Analisi dei risultati

L'obiettivo di questa tesi è confrontare un'interfaccia eye-tracking con una BCI per la selezione di target in contesti statici e dinamici, valutando parametri come precisione, affidabilità e adattabilità delle tecnologie in condizioni ideali e reali. I risultati ottenuti permettono di rispondere alle tre domande chiave della tesi, offrendo un'analisi dettagliata delle prestazioni delle interfacce HoloLens_0_3, HoloLens_2_5 e NextMind in vari scenari di valutazione. Complessivamente, i risultati indicano che non esiste una tecnologia universalmente ottimale per tutte le situazioni. Le prestazioni di ciascuna interfaccia variano in modo significativo in funzione del contesto di valutazione, evidenziando che ogni interfaccia possiede vantaggi e limitazioni specifici in relazione alle condizioni operative.

In riferimento alla domanda **R1**, HoloLens_0_3 ha dimostrato di avere il tempo di selezione più rapido, mentre HoloLens_2_5 ha offerto un miglior equilibrio tra velocità e consistenza. NextMind, pur avendo tempi di test simili a HoloLens_2_5, ha mostrato una maggiore variabilità nelle prestazioni, probabilmente dovuta alla sua suscettibilità alle differenze individuali tra gli utenti.

Nel contesto dinamico invece, rispondendo alla domanda **R2**, l'interfaccia HoloLens_0_3 si distingue per la sua velocità, il numero limitato di errori di timeout e la ridotta variabilità, suggerendo un'affidabilità elevata anche in contesti dinamici. Al contrario, HoloLens_2_5 e NextMind mostrano una maggiore variabilità e un numero più elevato di errori di timeout, indicando una prestazione potenzialmente meno affidabile in condizioni dinamiche.

Relativamente alla domanda **R3**, l'analisi delle prestazioni in presenza di distrattori mostra che HoloLens_0_3, pur registrando il tempo totale di test più veloce in entrambi i contesti, presenta un numero significativo di errori di selezione non corretta. Questo suggerisce che la maggiore velocità di selezione non si traduce sempre in elevata accuratezza. Questo dato è cruciale poiché, sebbene HoloLens_0_3 sembri più efficiente in termini di velocità, la sua precisione è compromessa in presenza di distrattori. Al contrario, NextMind non solo dimostra tempi di risposta più rapidi in presenza di distrattori rispetto HoloLens_2_5, ma mantiene anche un basso tasso di errori. Questi dati indicano che NextMind ha una maggiore capacità di gestire situazioni complesse, garantendo sia velocità che accuratezza nella selezione del target.

Quindi, mentre HoloLens_0_3 è vantaggioso per compiti che richiedono rapidità in assenza di distrattori, NextMind risulta essere più affidabile e preciso di HoloLens_2_5 in ambienti con presenza di distrattori, evidenziando una migliore robustezza in situazioni reali.

È interessante notare come NextMind mostri prestazioni significativamente superiori in presenza di distrattori. Questi risultati sono in linea con quelli riportati in uno studio citato precedentemente [63], il quale ha evidenziato una migliore capacità di selezione di NextMind di fronte a diversi NeuroTag simultanei. Questo potrebbe essere attribuito alla capacità dei sensori di NextMind di discriminare e interpretare in modo più efficace le diverse stimolazioni visive simultanee, consentendo una selezione più precisa dei target anche in ambienti complessi. D'altra parte, HoloLens_2_5 ha dimostrato una coerenza notevole, ottenendo risultati molto simili sia in assenza che in presenza di distrattori, indicando una stabilità delle prestazioni indipendentemente dalle condizioni operative.

Un dato di notevole interesse si osserva nella contrapposizione significativa tra i dati ottenuti dai test e le preferenze degli utenti espresse nei questionari somministrati. Sebbene HoloLens_0_3 abbia mostrato il maggior numero di errori, soprattutto in presenza di distrattori, è stato il preferito dagli utenti. Nel caso statico, il 41.7% degli utenti lo ha considerato l'interfaccia migliore, mentre nel caso dinamico il 37.5% ha espresso la stessa preferenza. In contrapposizione, alcuni utenti hanno trovato HoloLens_0_3 troppo veloce e estenuante nell'uso, spingendoli a preferire HoloLens_2_5 nonostante sia risultato il più lento in diversi contesti analizzati. Sebbene NextMind mostri una migliore velocità di selezione con distrattori rispetto a HoloLens_2_5, è stata l'interfaccia meno preferita dagli utenti. I commenti degli utenti si sono focalizzati principalmente su due aspetti critici: le difficoltà incontrate durante la fase di calibrazione e il discomfort associato all'uso prolungato dell'interfaccia. In particolare, gli utenti hanno segnalato che il dispositivo esercita una notevole pressione sulla pelle, risultando poco confortevole e fastidioso durante periodi di utilizzo prolungato. Al contrario, HoloLens 2 ha ricevuto apprezzamenti per la sua calibrazione semplice e veloce, oltre che per il comfort elevato, rendendolo adatto ad un uso prolungato.

Questi risultati sono rilevanti per il futuro poiché permettono di comprendere quale tecnologia sia più adatta in base al contesto di utilizzo, correlando le performance ottenute con l'esperienza utente. La comprensione delle differenze di prestazioni tra le tecnologie in base ai contesti operativi è fondamentale per lo sviluppo di interfacce più efficienti e user-friendly. Sebbene alcuni visori possano mostrare prestazioni superiori nei test, è essenziale considerare anche la facilità d'uso e il comfort per l'utente. Questo evidenzia la necessità di sviluppare tecnologie mirate per specifici gruppi di utenti e tipi di task, piuttosto che cercare una soluzione universale.

Capitolo 7

Conclusioni e sviluppi futuri

Questo capitolo presenta le conclusioni complessive dello studio condotto e propone potenziali sviluppi futuri per l'ottimizzazione del sistema.

7.1 Conclusioni

La HCI rappresenta un campo multidisciplinare che studia il design e l'uso delle tecnologie informatiche, focalizzandosi sulle interazioni tra gli utenti e i computer. L'obiettivo principale della HCI è migliorare l'usabilità e l'esperienza dell'utente, creando interfacce più intuitive ed efficienti. Negli ultimi anni, il settore ha visto una rapida evoluzione grazie all'introduzione di nuove tecnologie, come le BCI e i dispositivi HMD.

Queste innovazioni tecnologiche hanno portato allo sviluppo di metodi di input rivoluzionari per la selezione di target, un processo cruciale per il costante sviluppo della HCI. La selezione di target, che consiste nell'identificazione e nella scelta di un oggetto specifico all'interno di un'interfaccia digitale, richiede un livello elevato di precisione ed efficienza. Questo processo ha un impatto diretto sull'uso e sull'efficienza delle interfacce utente, rendendo la selezione di target fondamentale per la progettazione dei sistemi interattivi.

La selezione di target utilizzando le BCI e i dispositivi HMD rappresenta un'avanguardia tecnologica che potrebbe rivoluzionare il modo in cui interagiamo con i sistemi informatici. Le BCI permettono agli utenti di controllare i computer attraverso segnali cerebrali, eliminando la necessità di input fisici tradizionali come mouse e tastiera. Questa tecnologia ha il potenziale di migliorare significativamente l'accessibilità anche per persone portatrici di disabilità motorie, offrendo nuove modalità di interazione impensabili fino a pochi anni fa. In modo simile, gli HMD migliorano la precisione e l'efficacia della selezione di target, riducendo il carico cognitivo e permettendo un'interazione più naturale e immersiva con l'ambiente virtuale.

L'interfaccia NextMind si è dimostrata complessivamente precisa e affidabile. Tuttavia, sono emerse alcune limitazioni significative durante l'uso, tra cui un comfort limitato durante utilizzi prolungati, che può causare fastidio e dolore, un tempo di attivazione lento, difficoltà nella calibrazione del dispositivo e una qualità di riconoscimento dei sensori notevolmente inferiore nelle persone con capelli folti. Un altro vincolo rilevante è rappresentato dalla gestione simultanea di soli 10 NeuroTag, limitando le capacità operative in contesti complessi e reali. Infine, il flickering dei NeuroTag è stato percepito come fastidioso da molti utenti, compromettendo la concentrazione durante il test. Queste limitazioni hanno influenzato negativamente gli utenti verso l'uso di NextMind.

HoloLens 2 si è dimostrato notevolmente più confortevole rispetto a NextMind, come evidenziato dal feedback degli utenti, rendendolo adatto per utilizzi prolungati. Il processo di eye calibration è rapido e semplice, richiedendo poco sforzo da parte dell'utente e migliorando complessivamente l'esperienza di utilizzo. Grazie alla possibilità di configurare il tempo di selezione tramite eye-tracking, HoloLens 2 offre prestazioni superiori rispetto a NextMind. Questa configurabilità consente di adattare il tempo di selezione alle esigenze specifiche dell'utente, permettendo di ottimizzare l'efficienza sia in contesti che richiedono tempi più rapidi che in quelli che necessitano di maggiore precisione. Per esempio, durante i test è emerso che HoloLens 2 mostra una precisione inferiore in presenza di distrattori, poiché la velocità elevata di selezione aumenta la probabilità di focalizzarsi erroneamente su un bersaglio non desiderato. Tuttavia, in scenari privi di distrattori, ha dimostrato eccellenti performance. Di conseguenza, la corretta configurazione del tempo di selezione può rappresentare un vantaggio strategico a seconda delle circostanze operative.

Nel prossimo futuro, l'interazione uomo-computer diventerà progressivamente più importante e frequente, integrandosi sempre più nella vita di tutti i giorni. L'avvento del metaverso e di nuove realtà immersive offrirà opportunità senza precedenti per migliorare e evolvere le modalità di selezione di target. Queste nuove tecnologie promettono di abbandonare i vecchi metodi di input, sostituendoli con interazioni più naturali e rapide, che sfruttano sensori avanzati e intelligenza artificiale per comprendere meglio le intenzioni e le esigenze dell'utente. Con l'evoluzione delle tecnologie BCI e HMD, possiamo prevedere un futuro in cui le interfacce saranno sempre più adattive e personalizzate, capaci di rispondere in tempo reale ai segnali cerebrali e ai movimenti oculari degli utenti. Ciò non solo migliorerà l'efficienza e l'usabilità delle interfacce, ma aprirà anche nuove possibilità per applicazioni in ambiti come l'educazione, il lavoro collaborativo, l'intrattenimento e la riabilitazione. Questo segna un passo significativo verso un futuro in cui la tecnologia sarà ancora più integrata nella nostra vita quotidiana, migliorando la nostra interazione con il mondo digitale.

7.2 Sviluppi futuri

A seguire, un'analisi dettagliata e una proposta di sviluppi futuri che attraverso l'innovazione tecnologica potrebbero rivoluzionare diversi settori. Si esplorano potenzialità nell'ambito dell'accessibilità, delle applicazioni industriali e commerciali, della ricerca accademica e della sicurezza e salute.

Innovazione Tecnologica

L'analisi comparativa tra eye-tracking e BCI ha evidenziato potenziali miglioramenti per lo sviluppo di interfacce utente efficienti e intuitive. Integrando queste tecnologie in vari settori, si potrà ottimizzare l'interazione uomo-macchina, raggiungendo un'interazione più naturale e affidabile. I risultati dello studio possono guidare la progettazione di BCI e dispositivi di realtà aumentata avanzati, sfruttando appieno le potenzialità dell'eye-tracking e della nostra mente.

Accessibilità e Inclusività

Le tecnologie BCI come NextMind rappresentano una svolta significativa per le persone con vari livelli di disabilità motorie o comunicative, consentendo il controllo di dispositivi digitali attraverso l'attività cerebrale. Migliorare l'efficienza di queste tecnologie può rendere i dispositivi di facile accesso ad un pubblico diversificato, promuovendo così un ambiente più inclusivo.

Applicazioni Industriali e Commerciali

In ambito industriale, l'implementazione di eye-tracking e BCI può ottimizzare i processi di lavoro, migliorando l'efficienza e la sicurezza operativa. Queste tecnologie consentono operazioni più rapide e precise senza l'uso delle mani, riducendo il rischio di errori e incidenti sul lavoro. Inoltre, le aziende possono sfruttare queste innovazioni per creare esperienze utente più coinvolgenti e personalizzate, aumentando la soddisfazione dei clienti e l'efficacia delle campagne di marketing. La capacità di selezionare con precisione target statici e dinamici, anche in ambienti complessi e pieni di distrazioni sarà cruciale per migliorare la produttività e la sicurezza.

Ricerca Accademica

Il confronto tra eye-tracking e BCI apre nuove prospettive di studio nelle neuroscienze, nella psicologia cognitiva e nell'informatica. Questo studio non solo approfondisce la comprensione dei processi cognitivi e visivi coinvolti nell'interazione con la tecnologia, ma fornisce anche una metodologia dettagliata per la valutazione delle prestazioni delle interfacce utente. Tale metodologia può essere applicata in ulteriori ricerche e sviluppi tecnologici, contribuendo al progresso scientifico in questi campi. La gestione dei target e dei distrattori offrirà nuove opportunità di ricerca sui meccanismi cognitivi e visivi.

Sicurezza e Salute

Il monitoraggio dell'attenzione tramite eye-tracking può svolgere un ruolo cruciale in settori critici come l'aviazione e la guida, prevenendo incidenti attraverso l'avviso tempestivo in caso di disattenzione o stanchezza. Le tecnologie BCI basate su SSVEP offrono inoltre nuove soluzioni nel campo della medicina, consentendo diagnosi e trattamenti innovativi per disturbi neurologici e visivi. Uno studio approfondito di queste diverse tecnologie può fornire una comprensione specifica su quale sia la più idonea per persone con deficit visivi, normovedenti e con diversi disturbi neurologici. Questo permetterebbe di associare immediatamente, in base alle esigenze specifiche di ciascun individuo, l'interfaccia più adatta.

In conclusione, i risultati di questo studio aprono la strada a una serie di sviluppi futuri in grado di trasformare profondamente diversi tipi di settori, migliorando l'interazione uomo-macchina, promuovendo l'inclusività, ottimizzando processi industriali e commerciali, ampliando le frontiere della ricerca accademica e rafforzando la sicurezza e la salute. Questi progressi non solo testimoniano l'importanza di queste tecnologie emergenti, ma anche il loro potenziale nel creare un futuro accessibile e sicuro per tutti. Continuare a studiare e migliorare queste interfacce può rivoluzionare il modo in cui interagiamo con il mondo digitale.

Appendice A

Controlli sistema

UNITY APP

- Backspace: ritorna al menu principale
- D: avvia il test dinamico
- Numpad 0: avvia la prova utente
- O: attiva/disattiva i distrattori
- Q: esci dall'applicazione
- R: reimposta i parametri di configurazione utente
- S: avvia il test statico
- X: invia un messaggio all'app su HoloLens 2 per disabilitare gli ologrammi 3D

Bibliografia

- [1] O. Bimber and R. Raskar, *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. MA USA, 2005.
- [2] D.W.F. van Krevelen and R. Poelman, 'A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations', *The International Journal of Virtual Reality*, vol. 9, no. 2, pp. 1–20, 2010, [Online]. Available: <http://www.arvika.de/>
- [3] P. A. Rauschnabel, R. Felix, C. Hinsch, H. Shahab, and F. Alt, 'What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality', *Comput Human Behav*, vol. 133, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.chb.2022.107289.
- [4] D. Balsara and D. Gómez-Zar4, 'Virtual Threads: A Systematic Literature Review of 10 Years of VR/AR/MR Adoption in Fashion Design', in *Designing Interactive Systems Conference*, New York, NY, USA: ACM, Jul. 2024, pp. 356–371. doi: 10.1145/3643834.3661575.
- [5] Paul MILGRAM and Fumio KISHINO, 'A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays', *IEICE Trans Inf Syst*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321–1329, 1194.
- [6] Y. Xiao, Y. Wang, and Z. Fang, 'The Application of AR VR, and MR Technologies in the Museum Field: A Bibliometric Analysis from 2014 to 2023', in *Intelligent Human Systems Integration (IHSI 2024): Integrating People and Intelligent Systems*, AHFE International, 2024. doi: 10.54941/ahfe1004529.
- [7] David Kelly, Thuong N. Hoang, Martin Reinoso, Zaher Joukhadar, Tamara Clements, and Frank Vetere, 'Augmented reality learning environment for physiotherapy education', *Physical Therapy Reviews*, vol. 23, no. 1, 2018.
- [8] J. A. Konstan, E. H. Chi, K. (Writer on technology design) Höök, and SIGCHI (Group : U.S.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*.
- [9] T. Pejsa, J. Kantor, H. Benko, E. Ofek, and A. Wilson, 'Room2Room: Enabling Life-Size telepresence in a projected augmented reality environment', in *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work, CSCW*, Association for Computing Machinery, Feb. 2016, pp. 1716–1725. doi: 10.1145/2818048.2819965.
- [10] Francesco De Pace, Federico Manuri, Matteo Bosco, Andrea Sanna, and Hannes Kaufmann, 'Supporting Human–Robot Interaction by Projected Augmented Reality and a Brain Interface', doi: 10.1109/THMS.2024.3414208.
- [11] R. Bogue, 'Brain-computer interfaces: Control by thought', *Industrial Robot*, vol. 37, no. 2, pp. 126–132, 2010, doi: 10.1108/01439911011018894.
- [12] D. J. McFarland and J. R. Wolpaw, 'Brain-computer interfaces for communication and control', *Commun ACM*, vol. 54, no. 5, pp. 60–66, May 2011, doi: 10.1145/1941487.1941506.
- [13] A. Turnip, M. A. Suhendra, and W. S. Mada Sanjaya, 'Brain-controlled wheelchair based EEG-SSVEP signals classified by nonlinear adaptive filter', in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, IEEE Computer Society, Sep. 2015, pp. 905–908. doi: 10.1109/ICORR.2015.7281318.
- [14] G. Burkitt, R. Silberstein, P. Cadusch, and A. Wood, *Steady-state visual evoked potentials and travelling waves*, *Clinical Neurophysiology*, 2nd ed., vol. 111. 2000.
- [15] E. M. Mugler, C. A. Ruf, S. Halder, M. Bensch, and A. Kübler, 'Design and implementation of a P300-based brain-computer interface for controlling an internet browser', *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 599–609, Dec. 2010, doi: 10.1109/TNSRE.2010.2068059.
- [16] G. Edlinger, C. Holzner, and C. Guger, 'LNCS 6762 - A Hybrid Brain-Computer Interface for Smart Home Control', 2011.
- [17] Gao Q. and Zhao X., 'Controlling of smart home system based on brain-computer interface', *Technology and Health Care*, vol. 26, no. 5, pp. 769–783, 2018.
- [18] S. P. Karunasena, D. C. Ariyaratna, R. Ranaweera, J. Wijayakulasooriya, K. Kim, and T. Dassanayake, 'Single-channel EEG SSVEP-based BCI for robot arm control', in *2021 IEEE Sensors Applications Symposium, SAS 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers

- Inc., Aug. 2021. doi: 10.1109/SAS51076.2021.9530189.
- [19] R. K. Kanna, S. Prasath Alias Surendhar, M. R. Al-Hameed, A. M. Lafta, R. Khalid, and A. Hussain, 'Smart Prosthetic Arm Using Cognitive Application', in *2023 3rd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering, ICACITE 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 1330–1334. doi: 10.1109/ICACITE57410.2023.10182794.
- [20] R. K. Kanna and R. Vasuki, 'Advanced Study of ICA in EEG and Signal Acquisition using Mydaq and Lab view Application', 2019.
- [21] B. J. Hou *et al.*, 'Feasibility of a Device for Gaze Interaction by Visually-Evoked Brain Signals', in *Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*, Association for Computing Machinery, Jun. 2022. doi: 10.1145/3517031.3529232.
- [22] Frédéric Dehais *et al.*, 'A Dual Passive & Reactive Based SSVEP Brain Computer Interface in the Cockpit', 2021.
- [23] A. Sanna, F. Manuri, J. Fiorenza, and F. De Pace, 'BARI: An Affordable Brain-Augmented Reality Interface to Support Human–Robot Collaboration in Assembly Tasks', *Information (Switzerland)*, vol. 13, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/info13100460.
- [24] C. Uyanik, M. A. Khan, R. Das, J. P. Hansen, and S. Puthusserypady, 'Brainy Home: A Virtual Smart Home and Wheelchair Control Application Powered by Brain Computer Interface', *BIODEVICES*, pp. 134–141, 2022.
- [25] O. Geman, I. Chiuchisan, and D. Vicoveanu, 'Serious Games used in Rehabilitation of Patients with Osteoarthritis', *2021 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB)*, pp. 1–5, 2021.
- [26] Shintaro Ono, 'the_neuron_001: performance using brain computer interface', *SIGGRAPH Asia 2021 Real-Time Live!*, 2021.
- [27] E. Chatani, R. Nakamura, and Y. Sato, 'Degeneration of Communication is Evolution', in *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 1484–1485. doi: 10.1109/SII58957.2024.10417397.
- [28] S. Suchalova, M. Benco, and R. Hudec, 'The Research on Controlling Virtual Reality by EEG Sensor', in *20th Anniversary of IEEE International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications, ICETA 2022 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 634–639. doi: 10.1109/ICETA57911.2022.9974682.
- [29] V. Clay, P. König, and S. König, 'Eye tracking in virtual reality', *J Eye Mov Res*, vol. 12, no. 1, 2019, doi: 10.16910/jemr.12.1.3.
- [30] T. Lei, J. Chen, J. Chen, and B. Liu, 'Modeling the gaze point distribution to assist eye-based target selection in head-mounted displays', *Neural Comput Appl*, vol. 35, no. 36, pp. 25069–25081, Dec. 2023, doi: 10.1007/s00521-023-08705-8.
- [31] Andrew Duchowski, 'Eye Tracking Methodology', *Springer*, pp. 51–59, 2007.
- [32] Feng Li, Susan Munn, and Jeff Pelz, 'A model-based approach to video-based eye tracking', *J Mod Opt*, vol. 55, no. 4–5, pp. 503–531, 2008, doi: <https://doi.org/10.1080/09500340701467827>.
- [33] K. Krafska *et al.*, 'Eye Tracking for Everyone'. [Online]. Available: <http://gazecapture.csail.mit.edu>.
- [34] Y. S. Pai, T. Dingler, and K. Kunze, 'Assessing hands-free interactions for VR using eye gaze and electromyography', *Virtual Real*, vol. 23, no. 2, pp. 119–131, Jun. 2019, doi: 10.1007/s10055-018-0371-2.
- [35] Benjamin T. Carter and Steven G. Luke, 'Best practices in eye tracking research', *International Journal of Psychophysiology*, vol. 155, pp. 49–62, 2020.
- [36] S. Awasthi, V. Ross, M. Beyeler, and T. Höllerer, 'EyeTTS: Evaluating and Calibrating Eye Tracking for Mixed-Reality Locomotion', in *Proceedings - 2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct, ISMAR-Adjunct 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 479–480. doi: 10.1109/ISMAR-Adjunct60411.2023.00104.
- [37] C. Shi, D. Yang, S. Qiu, and J. Zhao, 'i-GSI: A Novel Grasp Switching Interface Based on Eye-Tracking and Augmented Reality for Multi-Grasp Prosthetic Hands', *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 8, no. 3, pp. 1619–1626, Mar. 2023, doi: 10.1109/LRA.2023.3240375.
- [38] T. J. Caruso *et al.*, 'Integrated eye tracking on Magic Leap One during augmented reality medical simulation: A technical report', *BMJ Simul Technol Enhanc Learn*, vol. 7, no. 5, pp. 431–434, Jul.

2021, doi: 10.1136/bmjstel-2020-000782.

- [39] N. Dias and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *SeGAH'17 : 2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH) : date of conference: 2-4 April 2017, conference location: Perth, Western Australia.*
- [40] Di I. Scott MacKenzie, *Human-computer interaction: an empirical research perspective.* Massachusetts, 2012.
- [41] Soukoreff RW and I. Scott MacKenzie, 'Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI', *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 61, no. 6, pp. 751–789, 2004.
- [42] Hajri AA, Fels S, Miller G, and Ilich M, *Moving target selection in 2D graphical user interfaces.* Springer, 2011.
- [43] Michael Bohan, Alex Chaparro, and Deborah Scarlett, 'The Effects of Selection Technique on Target Acquisition Movements Made with a Mouse', *Sage Journals*, vol. 42, no. 5, 1998.
- [44] X. Zhang, C. Lu, J. Yin, H. Xie, and T. Liu, 'The Study of Two Novel Speech-Based Selection Techniques in Voice-User Interfaces', *IEEE Access*, vol. 8, pp. 217024–217032, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041649.
- [45] MacKenzie IS, 'Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction.', *Hum Comput Interact*, vol. 7, no. 1, pp. 91–139, 1992.
- [46] M. Bohan and A. Chaparro, 'To Click or Not To Click: A Comparison of Two Target-Selection Methods for HCI'.
- [47] IEEE Signal Processing Society, *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing : proceedings : April 15-20, 2018, Calgary Telus Convention Center, Calgary, Alberta, Canada.*
- [48] A. Sears, M. Lin, and A. S. Karimullah, 'Speech-based cursor control: understanding the effects of target size, cursor speed, and command selection', vol. 2, pp. 30–43, 2002, doi: 10.1007/s10209-002-0034-6.
- [49] D. Yu, H.-N. Liang, F. Lu, V. Nanjappan, K. Papangelis, and W. Wang, 'Target Selection in Head-Mounted Display Virtual Reality Environments', 2018.
- [50] V. Tanriverdi and R. J. K. Jacob, 'CHI 2000 • 1-6 APRIL 2000 Papers INTERACTING WITH EYE MOVEMENTS IN VIRTUAL ENVIRONMENTS', 2000.
- [51] M. Kytö, B. Ens, T. Piumsomboon, G. A. Lee, and M. Billinghamurst, 'Pinpointing: Precise head- and eye-based target selection for augmented reality', in *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*, Association for Computing Machinery, Apr. 2018. doi: 10.1145/3173574.3173655.
- [52] J. Blattgerste, P. Renner, and T. Pfeiffer, 'Advantages of eye-gaze over head-gaze-based selection in virtual and augmented reality under varying field of views', in *Proceedings - COGAIN 2018: Communication by Gaze Interaction*, Association for Computing Machinery, Inc, Jun. 2018. doi: 10.1145/3206343.3206349.
- [53] A. S. Fernandes, T. S. Murdison, and M. J. Proulx, 'Leveling the Playing Field: A Comparative Reevaluation of Unmodified Eye Tracking as an Input and Interaction Modality for VR', *IEEE Trans Vis Comput Graph*, vol. 29, no. 5, pp. 2269–2279, May 2023, doi: 10.1109/TVCG.2023.3247058.
- [54] Y. Y. Qian and R. J. Teather, 'The eyes don't have it: An empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality', in *SUI 2017 - Proceedings of the 2017 Symposium on Spatial User Interaction*, Association for Computing Machinery, Inc, Oct. 2017, pp. 91–98. doi: 10.1145/3131277.3132182.
- [55] X. Zhang and I. S. Mackenzie, 'Human-Computer Interaction, Part III', 2007.
- [62] '<https://riptide.tomweiland.net/manual/overview/about-riptide.html>'.
- [63] B. J. Hou *et al.*, 'Feasibility of a Device for Gaze Interaction by Visually-Evoked Brain Signals', in *Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*, Association for Computing Machinery, Jun. 2022. doi: 10.1145/3517031.3529232.
- [64] A. K. Mutasim, A. U. Batmaz, and W. Stuerzlinger, 'Pinch, Click, or Dwell: Comparing Different Selection Techniques for Eye-Gaze-Based Pointing in Virtual Reality', in *Eye Tracking Research and Applications Symposium (ETRA)*, Association for Computing Machinery, May 2021. doi: 10.1145/3448018.3457998.

- [65] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle, and J. J. Higgins, ‘The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures’, in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM, May 2011, pp. 143–146. doi: 10.1145/1978942.1978963.
- [66] L. A. Elkin, M. Kay, J. J. Higgins, and J. O. Wobbrock, ‘An Aligned Rank Transform Procedure for Multifactor Contrast Tests’, in *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA: ACM, Oct. 2021, pp. 754–768. doi: 10.1145/3472749.3474784.

Sitografia

- [56] ‘<http://www.lg.com/>’.
- [57] ‘<http://www.microsoft.com/hololens/>’.
- [58] ‘<http://www.next-mind.com/>’.
- [59] ‘<https://github.com/Snapchat/NextMind/tree/main/unity-sdk>’.
- [60] ‘<http://unity.com/>’.
- [61] ‘<https://developer.vuforia.com/home>’.
- [67] ‘<https://www.xrpedagogy.com/en/what-is-xr/>’.
- [68] ‘<https://www.hochschule-rhein-waal.de/de/seite/bcihome>’.
- [69] ‘<https://www.interaction-design.org/literature/article/fitts-s-law-the-importance-of-size-and-distance-in-ui-design>’.
- [70] ‘<https://skarredghost.com/2021/03/04/nextmind-review-bci-vr/>’.
- [71] ‘https://www.researchgate.net/figure/The-HoloLens-2s-built-in-gaze-calibration-protocol-overlaid-by-our-recalibration-task_fig1_356252028’.
- [72] ‘<https://lehre.idh.uni-koeln.de/lehrveranstaltungen/wisem21/it-grundlagen-jura/client-server-architekturen/>’.