



**Politecnico  
di Torino**

**Politecnico di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea Dicembre 2023

# **Exergames in realtà virtuale e body tracking**

Riabilitazione motoria per pazienti affetti da malattia di  
Parkinson and post-Ictus

Relatori:

Andrea Bottino

Candidati:

Simone Lo Priore



## Riassunto

L'uso sempre più diffuso della realtà virtuale, favorito dal progresso tecnologico, si estende anche al campo della riabilitazione motoria e cognitiva. In questo contesto si inserisce l'obiettivo della tesi, ovvero lo sviluppo di tre exergames in realtà virtuale destinati alla riabilitazione motoria di pazienti affetti da morbo di Parkinson e da postumi di Ictus. Gli exergames hanno lo scopo di unire il fattore terapeutico a quello ludico, in modo da rendere gli esercizi riabilitativi più coinvolgenti. Utilizzando la telecamera di tracciamento dei movimenti Azure Kinect DK, vengono tracciati il corpo e i movimenti del paziente, che in tal modo può interagire e utilizzare gli exergames, mentre al tempo stesso vengono raccolte informazioni sul tracciamento, utili per una successiva analisi terapeutica. Gli exergames presentano livelli di difficoltà crescenti e obiettivi sfidanti per stimolare il coinvolgimento del paziente e favorirne il miglioramento terapeutico. Integrati in un progetto più ampio, i giochi sono parte di una piattaforma digitale che gestisce l'esecuzione e la raccolta dei dati prodotti durante le sessioni di gioco. I dettagli relativi alla raccolta e all'analisi dei dati sono stati concordati con i terapeuti e verranno utilizzati per adattare la terapia in base ai progressi individuali dei pazienti.

Sono stati analizzati diversi studi riguardanti l'efficacia della realtà virtuale nell'ambito della riabilitazione, sia motoria sia cognitiva, in particolare nei confronti delle terapie tradizionali, che quindi non prevedono il supporto tecnologico di un ambiente virtuale.

Da questi studi si evince che l'utilizzo della realtà virtuale nelle terapie riabilitative porta molteplici benefici sia in termini terapeutici, sia dal punto di vista del coinvolgimento dei pazienti. In particolare, gli exergames hanno dimostrato di influenzare positivamente la motivazione e la partecipazione dei pazienti, consentendo una terapia più efficace e riducendo la durata complessiva del trattamento ospedaliero.

Anche se alcuni studi hanno suggerito che l'efficacia della VR non supera quella della terapia convenzionale, l'uso della VR si è dimostrato vantaggioso nella fase subacuta della riabilitazione e specialmente quando viene fornita un'esperienza ludica coinvolgente. L'adattamento di esercizi terapeutici ad ambienti virtuali ha portato a un coinvolgimento maggiore del paziente e un aumento del numero di movimenti richiesti, con un impatto positivo sulla plasticità nervosa e il controllo muscolare.

Tuttavia, l'incidenza di effetti collaterali come capogiri e vomito è stata segnalata in alcuni casi durante le sedute terapeutiche in VR più immersive. Oltre a ciò, la VR può causare effetti collaterali come la cinetosi digitale e il deterioramento del trattamento tradizionale. Infatti, alcuni pazienti potrebbero anche adottare movimenti compensativi durante gli esercizi, compromettendo gli obiettivi terapeutici.

Alcune metanalisi hanno sottolineato come non ci siano per ora studi approfonditi che provino l'efficacia a lungo termine della riabilitazione con VR e affermano che pertanto i risultati disponibili attualmente sono limitati. Altre preoccupazioni riscontrate riguardano i costi iniziali elevati per l'hardware e il software VR, nonché la necessità di uno spazio adeguato. Al fine di aumentare l'efficacia della terapia in VR viene anche posta attenzione sul realismo dell'ambiente virtuale proposto, consigliando di sviluppare applicazioni con ambienti virtuali in cui vengono riprodotte situazioni di vita comune.

Nonostante le sfide, l'interesse per la VR nella riabilitazione è motivato dalla sua capacità di coinvolgere i pazienti e migliorare i risultati terapeutici, specialmente con l'uso di exergames e ambienti virtuali personalizzati. Sembra esserci un progresso graduale nel superare le difficoltà e rendere la VR più accessibile e accattivante per pazienti e terapeuti meno familiari con la tecnologia.

In questo ambito, in particolare nei trattamenti per patologie neurologiche come il morbo di Parkinson e le condizioni post-ictus, l'utilizzo di dispositivi VR come la Nintendo Wii e la Kinect ha mostrato risultati promettenti grazie alla loro efficacia, portabilità e basso costo. Allo stesso tempo, l'adozione di queste tecnologie richiede una valutazione attenta dei costi, della qualità, della facilità d'uso e dello spazio necessario per l'installazione. Infatti, è importante considerare la capacità dei terapisti e dei pazienti nel maneggiare tali dispositivi, soprattutto nelle prime fasi di interazione. Al fine di massimizzare i benefici della VR nella riabilitazione, è necessario trovare un equilibrio tra costi e qualità del trattamento, tenendo conto del contesto e delle capacità tecniche dei pazienti e dei terapisti.

Sono stati esaminati anche degli studi riguardanti le caratteristiche e l'affidabilità della Azure Kinect come strumento di tracciamento, in cui è stata messa a confronto con sistemi di tracciamento considerati gold-standard. I risultati mostrano che il dispositivo Microsoft ha un'enorme potenzialità per l'utilizzo in applicazioni fruibili in ambiente domestico e quindi anche ambulatoriale. In altri studi la Azure Kinect è stata anche confrontata con le versioni precedenti e negli esperimenti effettuati si può affermare che in termini di precisione e ripetibilità le sue performance sono migliori di entrambe le versioni precedenti.

Infine, è stata attestata l'importanza dei feedback visivi nella riabilitazione di pazienti post-ictus e con malattia di Parkinson, cruciale per migliorare la loro qualità di vita. I feedback visivi forniscono informazioni in tempo reale sulle azioni motorie, guidando e incoraggiando la corretta esecuzione dei movimenti e fornendo uno stimolo esterno per il recupero motorio. L'uso di feedback visivi ha portato benefici sia nel contesto post-ictus che nei pazienti con malattia di Parkinson. Nel contesto post-ictus, i feedback visivi hanno contribuito a migliorare significativamente le sinergie muscolari e i coefficienti di attivazione, riducendo le differenze muscolari tra gli arti colpiti e non colpiti. Nei pazienti con malattia di Parkinson, si sono riscontrati miglioramenti significativi nella deambulazione grazie all'uso di feedback visivi in tempo reale, con un miglioramento persistente nel tempo. L'uso di stimoli visivi esterni sembra contribuire alla creazione di una sorta di "memoria degli stimoli", che aiuta a mantenere certe abilità motorie nel tempo.

In conclusione, l'uso della realtà virtuale e dei feedback visivi, insieme alla terapia convenzionale, permette anche di quantificare lo stato funzionale dei pazienti prima e dopo la sessione di riabilitazione, offrendo un quadro più completo del loro recupero. Tutto ciò rappresenta una strategia promettente per migliorare il recupero motorio e la qualità della vita dei pazienti post-ictus e affetti da Parkinson, offrendo un ambiente terapeutico più coinvolgente e stimolante.

Microsoft ha introdotto il dispositivo Azure Kinect DK nel 2019, progettato come sensore RGB-Depth di nuova generazione e utilizzabile indipendentemente dalle console di gioco. L'Azure Kinect DK offre un Software Development Kit (SDK) che consente l'accesso alle funzionalità della telecamera e del body tracking, con la possibilità di creare software personalizzati in ambienti di sviluppo come C++ o C#.

Durante la fase iniziale del progetto di sviluppo di exergames per la riabilitazione motoria, sono stati individuati due obiettivi principali: il recupero del controllo e del coordinamento motorio dell'arto superiore compromesso e il recupero del controllo posturale del tronco. Sono stati definiti movimenti specifici per stimolare queste funzionalità e garantire un trattamento mirato.

Le linee guida per lo sviluppo degli exergames hanno incluso diverse caratteristiche chiave, come l'utilizzo di feedback positivi per incoraggiare i pazienti durante l'esercizio e per motivarli a raggiungere gli obiettivi prefissati. È prevista la presenza di un tutorial iniziale per illustrare il corretto movimento da eseguire. Gli exergames prevedono anche l'uso di avatar che riflettono i movimenti reali del

paziente, consentendo un riscontro in tempo reale e una minima latenza per un'esperienza di gioco più immersiva.

Sono inclusi feedback visivi e stimoli sonori per migliorare l'esperienza di gioco e offrire un feedback aggiuntivo al paziente. I giochi sono strutturati con livelli di difficoltà crescente e parametri modificabili per adattarsi alle capacità motorie del paziente, come la velocità di gioco regolabile in base al livello di compromissione motoria. Inoltre, la gestione remota consente al terapeuta di regolare il livello di gioco in base ai risultati ottenuti, senza causare stress al paziente.

La fase preliminare è comune a tutti e tre gli exergames e prevede un attento posizionamento della Kinect e del paziente per garantire un tracciamento accurato. È raccomandato l'uso di un cavalletto per regolare l'altezza e l'inclinazione della Kinect, mentre l'utente deve posizionarsi frontalmente e a una distanza specifica dalla telecamera. Un'interfaccia guidata fornisce indicazioni visive e avvisi per garantire il posizionamento corretto del dispositivo e del paziente. Inoltre, viene consentita la scelta della mano preferita per la navigazione nei menu di gioco attraverso un riconoscimento gestuale. Prima del menù principale di ogni exergame è presente una schermata in cui è spiegato come interagire con i tasti interattivi presenti nei vari menù utilizzando il body tracking.

Infine, in tutti gli exergames, prima dell'avvio di una sessione di gioco, è presente una schermata di tutorial in cui viene riprodotto il video di una terapeuta che mostra l'esatto movimento da effettuare per l'esecuzione del gioco corrispondente.

L'exergame "Sci di fondo" prevede di comandare un avatar sciatore in differenti piste di sci di fondo tramite i movimenti effettuati dall'utente. Lo scopo è arrivare al traguardo nel minor tempo possibile, evitando i bordi esterni e raccogliendo oggetti-bonus. L'attività motoria richiesta dal gioco consiste in movimenti ritmici alternati e paralleli degli arti superiori, stimolando la coordinazione, la forza, la mobilità e l'equilibrio posturale. Questo esercizio contribuisce anche alla stimolazione cognitiva, richiedendo al paziente di concentrarsi sui movimenti delle braccia in un contesto ludico virtuale. Esso presenta la possibilità di scegliere fra quattro livelli di difficoltà, ciascuno corrispondente a piste di diversa complessità: rettilinea, curva, ad S e circuito chiuso. Inoltre, è possibile modificare la velocità massima raggiungibile dall'avatar scegliendo tra tre differenti livelli.

Nell'exergame "Aeroplano", il giocatore governa un aereo in un "corridoio aereo" al fine di arrivare alla fine del percorso attraversando cerchi-bonus ed evitando gli ostacoli presenti. Il movimento coinvolge flessioni laterali e antero-posteriori del tronco insieme all'apertura laterale delle braccia, simulando le ali di un aeroplano. L'inclinazione dell'aereo rispecchia infatti i movimenti delle braccia e del tronco del paziente. Questo esercizio mira a migliorare la coordinazione motoria, la forza degli arti superiori, la postura e la mobilità di testa, tronco, spalle e bacino. A livello cognitivo il gioco richiede concentrazione e abilità di controllo dell'aereo nel valutare il percorso da seguire.

I livelli di difficoltà proposti sono tre ed includono diverse disposizioni di ostacoli da evitare e cerchi da attraversare. Dal secondo livello in poi è inoltre necessario effettuare un decollo da terra, effettuando quindi un leggero movimento del tronco all'indietro. Anche in questo exergame si può scegliere fra tre diversi livelli di velocità massima raggiungibile dall'aereo.

Nell'exergame "Tastiera", il giocatore utilizza una mano virtuale per premere i pulsanti di una tastiera, seguendo un ordine specifico e cercando di commettere il minor numero possibile di errori. Il movimento della mano virtuale corrisponde ai movimenti della mano reale del paziente. Questo esercizio sollecita gli arti superiori, uno alla volta, attraverso movimenti di estensione frontale e posizionamento, migliorando la coordinazione, la forza degli arti superiori e la postura di testa e tronco. L'aspetto cognitivo è anch'esso coinvolto, richiedendo attenzione sostenuta e selettiva per eseguire i movimenti e prendere decisioni rapide sui tasti da premere.

L'exergame offre la possibilità di scegliere fra tre differenti livelli di difficoltà, in cui è possibile impostare la lunghezza di serie di tasti da premere (5, 7 o 10 tasti).

Al fine di valutare l'usabilità e il carico di lavoro degli exergames sono stati utilizzati i questionari SUS e NASA-TLX. I questionari sono stati somministrati a 32 soggetti sani che hanno partecipato alle sessioni di test, in cui ciascuno di essi ha svolto almeno due prove per ogni exergame. Ciascun questionario, sia il SUS che il NASA-TLX, è stato somministrato ai partecipanti specificamente in relazione a ciascun singolo exergame, al fine di valutare dettagliatamente ogni aspetto per ogni applicazione.

Per quanto riguarda l'usabilità, i risultati ottenuti hanno mostrato un ottimo livello per gli exergame Tastiera e Aereo, i quali rispettivamente hanno ottenuto 83 e 89 come SUS score medio. Questo risultato riflette non solo la soddisfazione generale degli utenti, ma anche un elevato livello di apprezzamento e facilità d'uso dei due applicativi, sottolineando così il successo nell'ottenere un'esperienza utente positiva e accessibile. L'exergame Sci di Fondo ha invece ottenuto un punteggio di 71, un livello più basso ma superiore al punteggio di riferimento di 68, il quale corrisponde alla soglia per considerare facilmente usabile un sistema. I movimenti richiesti da questo exergame sono infatti più complessi e ciò si ripercuote anche sull'esperienza di gioco. Inoltre, esso richiede maggior tempo per poter prendere confidenza con le meccaniche di gioco e questa fase di test non ha previsto un numero sufficiente di prove per far esercitare adeguatamente i partecipanti.

I risultati derivanti dai questionari NASA-TLX invece indicano un basso livello del carico di lavoro percepito dagli utenti per tutti gli exergames. In particolare, l'exergame Tastiera si è dimostrato particolarmente facile da eseguire, poiché l'esercizio riabilitativo su cui si basa non richiede sforzi eccessivi. Rispetto ad esso gli altri due exergames sono sicuramente più impegnativi, sia dal punto di vista mentale sia da quello fisico. Non sono però emerse criticità particolari, se non per l'exergame Sci, il quale come detto in precedenza è caratterizzato da un movimento riabilitativo intrinsecamente più impegnativo. Dai risultati, infatti, emerge che solamente il 27,78% dei partecipanti afferma di non averlo trovato fisicamente impegnativo. Sicuramente esso corrisponde al più complesso da utilizzare e il più faticoso.

In aggiunta a questi risultati, sono stati inclusi anche quelli relativi a due sperimentazioni ospedaliere eseguite sugli exergames. La prima ha coinvolto un gruppo di pazienti post-Ictus, e i risultati sono stati eterogenei: alcuni pazienti hanno aumentato i carichi di lavoro giorno dopo giorno, mentre altri li hanno ridotti. L'aspetto significativo emerso da questa sperimentazione è la necessità di migliorare le capacità degli exergames nell'adattare il carico del lavoro richiesto ai propri utenti, soprattutto per chi ha necessità di ridurlo. Risulta perciò fondamentale avere parametri di gioco che permettano una maggiore personalizzazione dell'esperienza di gioco, in modo da andare incontro alle esigenze dei pazienti con maggiori difficoltà.

La seconda sperimentazione ha invece coinvolto 15 soggetti con malattia di Parkinson ai quali sono stati somministrati i questionari SUS, dopo una fase di prova di tutti gli exergames. I risultati ottenuti non sono particolarmente attendibili poiché i questionari sono stati somministrati valutando l'insieme degli exergames anziché analizzandoli singolarmente. I questionari SUS somministrati hanno restituito un punteggio complessivo di 69 ( $\pm 22.1$  punti), un valore sufficiente e poco al di sopra del punteggio di riferimento di 68, che rappresenta il punteggio minimo per considerare un sistema facilmente usabile. Sembra quindi che i pazienti abbiano riscontrato maggiori difficoltà rispetto ai soggetti sani nell'uso degli exergame. Tuttavia, sarebbero necessarie analisi più dettagliate per poter trarre conclusioni valide.

I risultati delle sperimentazioni mostrano un buon livello d'uso e un carico di lavoro percepito non elevato per tutte e tre gli exergames, evidenziando l'efficacia del lavoro svolto. Oltre a questo, sono

state eseguite anche le prime sessioni di prova con i pazienti, che hanno in parte confermato l'efficacia degli exergame come strumenti riabilitativi. Tuttavia, alcune criticità sono emerse, evidenziando la necessità di ulteriori test con pazienti e terapeuti. I test sugli exergames hanno fornito dati rilevanti, ma una più approfondita analisi con sessioni di prova aggiuntive potrebbe confermare l'efficacia e valutare i miglioramenti dei pazienti nel tempo. Ulteriori test potrebbero perfezionare meccaniche e personalizzazione, adattando il gioco a pazienti con diversi livelli di compromissione. Dal punto di vista tecnologico, una transizione a dispositivi più accessibili potrebbe favorirne la diffusione e semplificarne l'uso domiciliare. Nonostante alcune criticità, il progetto apre prospettive per gli exergames nella riabilitazione domiciliare, con possibilità di sviluppi futuri e miglioramenti nel campo della riabilitazione virtuale.

# Indice

<b>RIASSUNTO .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>10</b>
LA REALTÀ VIRTUALE .....	11
MALATTIA DI PARKINSON.....	12
POSTUMI DI ICTUS .....	12
<b>STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>14</b>
EFFICACIA DELLA REALTÀ VIRTUALE NELLA RIABILITAZIONE .....	14
CRITICITÀ RICONTRATE .....	17
DISPOSITIVI TECNOLOGICI.....	19
FEEDBACK VISIVI .....	22
<b>METODI.....</b>	<b>25</b>
PANORAMICA ESERCIZI RIABILITATIVI.....	25
<i>Esercizi motori nella malattia di Parkinson e post-Ictus .....</i>	<i>25</i>
<i>Malattia di Parkinson.....</i>	<i>26</i>
<i>Postumi di Ictus.....</i>	<i>26</i>
CARATTERISTICHE PRINCIPALI EXERGAMES RIABILITATIVI .....	27
<i>Specifiche movimenti riabilitativi .....</i>	<i>28</i>
<i>Parametri statici e cinematici .....</i>	<i>30</i>
PANORAMICA EXERGAMES .....	31
<i>Progetto ReHome.....</i>	<i>31</i>
<i>Unity.....</i>	<i>31</i>
<i>Sistemi di tracciamento e dispositivi di input.....</i>	<i>31</i>
<i>Algoritmo di body tracking .....</i>	<i>36</i>
<i>Il modello scheletrico .....</i>	<i>37</i>
<i>Validazione algoritmo di body tracking con sistemi marker-based .....</i>	<i>39</i>
PROGETTAZIONE EXERGAMES .....	42
<i>Elementi in comune.....</i>	<i>42</i>
<i>Exergame Sci di Fondo .....</i>	<i>46</i>
<i>Exergame Tastiera .....</i>	<i>50</i>
<i>Exergame Aereo.....</i>	<i>54</i>
<i>Specifiche dati in ingresso e in uscita.....</i>	<i>58</i>
<b>RISULTATI.....</b>	<b>62</b>
USABILITÀ .....	62
<i>Questionario SUS .....</i>	<i>62</i>
<i>Risultati soggetti sani.....</i>	<i>62</i>
AFFATICAMENTO .....	67
<i>Questionario NASA Task Load Index .....</i>	<i>67</i>
<i>Exergame Tastiera .....</i>	<i>67</i>
<i>Exergame Aereo.....</i>	<i>68</i>



<i>Exergame Sci di fondo</i> .....	69
RISULTATI DI GIOCO .....	69
<i>Exergame Tastiera</i> .....	70
<i>Exergame Aereo</i> .....	72
<i>Exergame Sci di fondo</i> .....	74
RISULTATI SPERIMENTAZIONE PAZIENTI POST-ICTUS .....	75
RISULTATI SPERIMENTAZIONE PAZIENTI PARKINSON.....	78
<b>CONCLUSIONE</b> .....	<b>80</b>
SVILUPPI FUTURI.....	81
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>82</b>

## Introduzione

I progressi tecnologici hanno esteso notevolmente l'utilizzo della realtà virtuale in vari settori negli ultimi dieci anni, spaziando dallo sport all'intrattenimento fino ad arrivare alla medicina. Quest'ultima, in particolare, sta vivendo una crescente adozione della realtà virtuale, soprattutto nel campo della riabilitazione cognitiva e motoria dei pazienti ospedalieri. Tale interesse in costante aumento è alimentato dalla necessità di introdurre nuovi strumenti che incrementino la partecipazione e l'interesse dei pazienti, migliorino il monitoraggio delle terapie facilitando il lavoro dei terapeuti e ottimizzino l'utilizzo delle risorse sanitarie mediante sistemi più efficienti rispetto ai metodi tradizionali.

I pazienti ospedalieri spesso si trovano a dover affrontare spostamenti frequenti tra diversi ambulatori per eseguire sessioni di riabilitazione che possono risultare tediose e poco stimolanti. Lo sviluppo di strumenti che consentono l'esecuzione degli esercizi terapeutici anche a domicilio riveste un ruolo importante per apportare notevoli benefici sia alla qualità di vita dei pazienti, sia al lavoro dei terapeuti, riducendo la necessità di lunghe sessioni tradizionali di terapia. Inoltre, questo approccio offre la possibilità di rilevare e analizzare quantitativamente le prestazioni dei pazienti durante l'esecuzione degli esercizi. L'analisi dei dati raccolti permette di condurre studi statistici sulla situazione clinica del paziente, fornendo l'opportunità di personalizzare la terapia in base ai risultati ottenuti.

L'obiettivo principale di questa tesi è lo sviluppo di tre exergames in ambiente virtuale, progettati specificamente per la riabilitazione motoria di pazienti affetti da morbo di Parkinson e paralisi parziale degli arti dovuta a postumi di Ictus. Queste applicazioni sfruttano la tecnologia di tracciamento dei movimenti fornita dalla Azure Kinect DK, una telecamera avanzata di tracciamento dei movimenti sviluppata da Microsoft, in grado di catturare dati tridimensionali del corpo e fornire un'esperienza di tracciamento precisa e dettagliata. Essa viene utilizzata per consentire l'interazione dell'utente con le applicazioni e per raccogliere dati di tracciamento che sono successivamente utilizzati per analisi future. Ciascun exergame è basato su uno specifico esercizio riabilitativo, concordato con i terapeuti, che gli utenti dovranno eseguire per giocare e completare le sessioni di gioco. Gli exergames sono caratterizzati da livelli di difficoltà crescenti e traguardi da raggiungere, per questioni sia terapeutiche sia di gamification<sup>1</sup>. Si è posta molta importanza sull'aspetto coinvolgente degli exergames, con l'intento di stimolare il paziente a migliorare i punteggi ottenuti e a eseguire gli esercizi con sempre maggiore precisione. L'obiettivo è incentivare un maggior impegno terapeutico e ottenere benefici più consistenti in termini di riabilitazione.

Questi exergames costituiscono parte di un progetto più ampio, all'interno del quale è presente una piattaforma digitale che avvia e gestisce l'esecuzione dei giochi, raccogliendo successivamente i dati prodotti. La definizione di quali dati rilevare durante ogni gioco è stata concordata con i terapeuti, e l'analisi dei dati sarà effettuata attraverso la piattaforma e altri strumenti disponibili ai medici.

---

1

La gamification è l'applicazione di elementi da gioco, come premi e competizioni, in contesti non ludici per motivare e coinvolgere le persone, migliorando l'esperienza e il coinvolgimento.

## La realtà virtuale

Il pensiero comune su cosa sia la realtà virtuale spesso verte su una sola delle varie tipologie che essa include, ovvero quella immersiva, in cui si indossano dei visori per la realtà virtuale in grado di farti immergere totalmente in un ambiente simulato, per lo meno dal punto di vista visivo e sonoro. Questo è un equivoco dovuto probabilmente a come essa viene solitamente presentata dal mondo dell'intrattenimento e in particolare nei film di fantascienza, in cui i personaggi si immergono in una simulazione virtuale attraverso un avatar. La realtà virtuale invece può anche essere una simulazione molto più semplice e anzi comprendere tutti i tipi di simulazioni che possono essere ricreate da un computer. La Cambridge University la definisce in questo modo: la realtà virtuale è un insieme di immagini e suoni, prodotti da un computer, che sembra rappresentare un posto o una situazione a cui una persona può prendere parte [1].

La realtà virtuale si può perciò definire come l'uso della modellazione e della simulazione computerizzata per permettere ad una persona di interagire con un ambiente visivo e sensoriale artificiale. Le applicazioni in VR (virtual reality) immergono l'utente in un ambiente simulato da un computer attraverso dispositivi di interazione, che permettono lo scambio di informazioni tra computer e umano. Questi dispositivi possono essere di vario tipo e vanno dal semplice joystick all'ultimo modello di headsets indossabili.

Esistono varie tipologie di Realtà Virtuale, la più comune di tutte è la Desktop VR, anche detta Windows on World (WoW), che corrisponde al classico uso di un'applicazione in realtà virtuale attraverso uno schermo comune. Ne sono un esempio i videogiochi per il computer o per le console. Attraverso un limitato numero di interfacce, quali monitor, mouse e tastiera, joystick si interagisce con il mondo virtuale. Ovviamente questa tipologia comporta una limitata complessità e anche una scarsa immersività. Tuttavia, ancora oggi rimane la modalità più utilizzata.

La realtà virtuale si può perciò definire come l'uso della modellazione e della simulazione computerizzata per permettere ad una persona di interagire con un ambiente visivo e sensoriale artificiale. Le applicazioni in VR (virtual reality) immergono l'utente in un ambiente simulato da un computer attraverso dispositivi di interazione, che permettono lo scambio di informazioni tra computer e umano. Questi dispositivi possono essere di vario tipo e vanno dal semplice joystick all'ultimo modello di headsets indossabili.

Esistono varie tipologie di Realtà Virtuale, la più comune di tutte è la Desktop VR, anche detta Windows on World (WoW), che corrisponde al classico uso di un'applicazione in realtà virtuale attraverso uno schermo comune. Ne sono un esempio i videogiochi per il computer o per le console. Attraverso un limitato numero di interfacce, quali monitor, mouse, tastiera e joystick si interagisce con il mondo virtuale. Ovviamente questa tipologia comporta una limitata complessità e anche una scarsa immersività; tuttavia, ancora oggi rimane la modalità più utilizzata.

Un'altra tipologia molto conosciuta è invece la VR immersiva, quella a cui tutti pensano quando si parla di realtà virtuale. Essa è caratterizzata da tutte le componenti richieste ad una simulazione realistica, quali presenza, immersione e interazione. Queste componenti possono variare in quantità in base alle tecnologie e ai dispositivi utilizzati. Per ottenere la massima immersività ci si concentra in particolar modo sul canale visivo, nel quale si cerca di ottenere una copertura completa del campo visivo umano (FOV), solitamente sfruttando occhiali indossabili che permettano di avere una visione stereoscopica dell'ambiente virtuale e una prospettiva legata ai movimenti della testa. Oltre a ciò, si sfruttano il più possibile dispositivi in grado di restituire feedback multimodali, ovvero per lo più feedback sonori, tattili e motori.

## Malattia di Parkinson

La malattia di Parkinson è un disturbo cerebrale che comporta tremore, rigidità e difficoltà nella deambulazione, nell'equilibrio e nella coordinazione. I sintomi solitamente iniziano gradualmente e peggiorano con il tempo. Con il progresso della malattia possono inoltre insorgere difficoltà nel parlare e nel camminare, insieme ad altri problemi come disfunzioni cognitive e comportamentali, depressione e perdita di memoria. La malattia colpisce il 50% di più gli uomini delle donne ed il primo fattore di rischio è l'età. La maggior parte delle persone sviluppa il Parkinson a circa 60 anni e solo dal 5 al 10% delle persone con Parkinson lo hanno sviluppato precocemente prima dei 50 anni. Di solito le forme precoci sono ereditarie oppure collegate a qualche specifica mutazione genetica.

La malattia può portare alla morte o alla compromissione di cellule nervose ai gangli della base, un'area del cervello che controlla il movimento. Normalmente queste cellule nervose producono un importante neurotrasmettitore, la dopamina. Quando i neuroni sono compromessi però ne producono meno e causano problemi motori caratteristici del Parkinson. Purtroppo, il motivo della morte di queste cellule è ancora ignoto. Molti ricercatori credono che il verificarsi della malattia sia una combinazione di fattori genetici e fattori ambientali, quali per esempio l'esposizione a sostanze tossiche.

Nel caso della malattia di Parkinson, il trattamento riabilitativo comprendente gli esercizi motori ha un ruolo complementare al trattamento farmacologico dei sintomi. La fisioterapia riveste infatti un ruolo fondamentale per massimizzare la qualità del movimento, l'indipendenza funzionale ed il benessere generale; oltre a ciò, è in grado di minimizzare le possibili complicazioni secondarie e di aumentare la sicurezza dei pazienti [2]. La terapia riabilitativa tradizionale ha quindi l'obiettivo di ottimizzare le funzionalità motorie residue, prevenendo le conseguenze dirette ed indirette legate al progressivo deterioramento motorio, che possono coincidere con l'aumento del rischio di cadute, l'inattività motoria e l'isolamento sociale. L'opportunità di seguire un trattamento in un contesto domiciliare, più agevole e familiare, può dunque rivestire un ruolo chiave nel proseguire l'attività sul controllo e sul coordinamento motorio attraverso esercizi mirati e stimolanti dal punto di vista fisico, favorendo l'acquisizione di una maggiore sicurezza nei movimenti e sul mantenimento di uno stile di vita attivo, indipendente ed autonomo, con conseguente impatto positivo sullo stato psico-fisico generale del paziente.

Gli exergames interesseranno le funzionalità del tronco e degli arti superiori, stimolandone il controllo e la coordinazione. Questa scelta è motivata principalmente dalla necessità di sollecitare l'equilibrio e la stabilità posturale attraverso una stimolazione multi-distrettuale, coinvolgendo sia il tronco che gli arti. Inoltre, favorisce il multi-tasking, poiché implica interazioni motorie e cognitive simultanee.

## Postumi di Ictus

Un paziente post-ictus, come suggerisce il nome, presenta una condizione di salute dovuta al verificarsi di un ictus, una patologia in cui uno scarso afflusso di sangue al cervello causa la morte di alcune cellule cerebrali. Esso può essere di due tipi: ischemico, dovuto ad una mancanza di flusso sanguigno, ed emorragico, dovuto ad un sanguinamento. Entrambe le tipologie causano lo scorretto funzionamento di alcune porzioni del cervello e ciò può comportare sintomi quali incapacità di muovere o di percepire un lato del corpo, problemi alla comprensione o all'esprimere parole, stordimento o riduzione del campo visivo. Il principale fattore di rischio è la pressione sanguigna alta, a cui si aggiungono altri fattori quali il colesterolo alto, il fumo di tabacco, l'obesità, il diabete, un precedente attacco ischemico transitorio (TIA) e la fibrillazione atriale. L'ictus ischemico è tipicamente causato dal blocco di un vaso sanguigno, mentre quello emorragico è causato da un sanguinamento che può verificarsi direttamente all'interno del cervello o nello spazio tra le membrane cerebrali.

L'emorragia può essere dovuta da un aneurisma cerebrale. In Italia, l'ictus rappresenta la principale causa d'invalidità e la seconda causa di demenza, oltre ad essere la terza causa di morte dopo le malattie cardiovascolari e i tumori. Il rischio aumenta esponenzialmente dai 30 anni di età e l'età avanzata corrisponde il fattore di rischio più significativo (il 95% degli ictus si presenta dopo i 45 anni).

Nell'ambito del post-ictus quindi, la terapia riabilitativa e l'esercizio fisico hanno un ruolo fondamentale nel recupero funzionale della parte lesa [3]. L'obiettivo della riabilitazione in questo caso è quello di recuperare parzialmente o totalmente le funzionalità motorie generali e quelle specifiche della parte del corpo affetta da paralisi. Questo è possibile grazie alla definizione di un percorso di riapprendimento delle abilità funzionali primarie; in questo modo si è in grado di restituire al paziente autonomia e indipendenza nelle attività quotidiane. La possibilità di fruire di un trattamento domiciliare può rivestire un ruolo fondamentale nel proseguimento del recupero funzionale attraverso una adeguata e continua stimolazione, consentendo di migliorare o di mantenere nel tempo le funzionalità riacquisite attraverso la fisioterapia tradizionale e di evitare il "learned nonuse" [4], cioè un fenomeno causato dal "non uso" volontario dell'arto riabilitato, che porta inevitabilmente al decadimento funzionale.

In questo caso gli exergames si rivolgono alla stimolazione della funzionalità dell'arto superiore compromesso ed al controllo posturale, migliorando la destrezza e l'ampiezza di movimento dell'arto, insieme alla coordinazione generale del paziente. Ciò verrà ottenuto attraverso stimolazioni specifiche e coordinate dell'arto in questione e mediante varie sollecitazioni per il mantenimento di una postura corretta, entrambi aspetti fondamentali nella vita quotidiana.

## Stato dell'arte

In questi ultimi anni, la realtà virtuale (VR) ha iniziato ad essere testata e utilizzata come strumento terapeutico in varie ricerche neuro-riabilitative. Il suo utilizzo è sempre più richiesto in quanto nell'ambito riabilitativo si è sempre alla ricerca di miglioramenti relativi alla qualità e alla quantità dei trattamenti. L'obiettivo più importante per la riabilitazione è permettere ai pazienti di ottenere una sempre maggior indipendenza nelle attività della vita quotidiana. Inoltre, la diminuzione dei costi e del tempo dedicato alla terapia da parte del sistema sanitario sono questioni sempre più cruciali, in quanto spesso, a causa di questi fattori, non si è in grado di fornire miglioramenti ottimali nel breve periodo. Oltre a ciò, le terapie spesso hanno tempi lunghi di svolgimento a causa della perdita di interesse dei pazienti o a causa di mancanze di personale o tecnologiche. Pertanto, la realtà virtuale risulta ideale come soluzione a queste necessità e, in particolare, per la riabilitazione cognitiva e motoria. Essa ha infatti le potenzialità per raggiungere tutti questi obiettivi. Sin dal 2003 [5] è considerata come uno strumento promettente con un ampio raggio di applicazione, in grado di ottimizzare la terapia in un ambiente sicuro e di replicare scenari di vita quotidiana, aumentando le possibilità di miglioramento dei movimenti funzionali alla vita quotidiana. Tuttavia, l'effettivo impatto di questa tecnologia sul settore riabilitativo rimane ancora controverso e poco chiaro, nonostante siano ormai tantissimi i progetti di ricerca che vertono su questi strumenti. Sarà in grado di sostituire la terapia convenzionale o potrà essere utilizzata come affiancamento ad essa? Analizzando diversi studi recenti, emergono alcuni risultati positivi che permettono di essere fiduciosi nell'utilizzo di questa tecnologia in campo riabilitativo nel breve periodo. Ovviamente, come è consuetudine, sono presenti problematiche che dovranno essere superate e risolte, al fine di confermare questo strumento come affidabile e soprattutto utile ed efficace.

Nei paragrafi successivi verrà esposta una breve panoramica sull'attuale utilizzo della realtà virtuale in campo riabilitativo, focalizzandosi sul suo impiego nelle terapie per malati di Parkinson e pazienti post-Ictus. In particolare, si analizzeranno le tecnologie più utilizzate ed in che modo esse vengono usate in relazione alle terapie tradizionali. Verranno anche citati alcuni studi che mostrano i risultati ottenuti finora nella sperimentazione di questo nuovo approccio terapeutico e che ne evidenziano i vantaggi e gli eventuali svantaggi. Oltre a ciò, sarà presente inizialmente un quadro sulla malattia di Parkinson e sul post-Ictus, unitamente alle relative terapie più utilizzate.

## Efficacia della realtà virtuale nella riabilitazione

La malattia di Parkinson e il post-Ictus richiedono, oltre alla prescrizione di farmaci opportuni, che i pazienti seguano regolari sedute di fisioterapia. Quest'ultima è sempre più incentivata come trattamento aggiuntivo fin dalle prime fasi della riabilitazione. In questo contesto la realtà virtuale si propone come nuovo strumento riabilitativo in grado di aggiungere valore agli approcci terapeutici tradizionali e di offrire un'ampia varietà di utilizzo.

Negli ultimi decenni, infatti, sempre più ricercatori e clinici hanno iniziato ad utilizzare la realtà virtuale (VR) per sviluppare nuove tecnologie a supporto della riabilitazione cognitiva e motoria. La domanda che molti si pongono è quanto la VR sia efficace e quali siano i vantaggi che porta all'interno di un percorso riabilitativo, sia dal punto di vista dei pazienti, sia da quello dei terapeuti. Sono stati realizzati molti studi a riguardo, che a loro volta analizzano i risultati ottenuti da altri studi e progetti inerenti.

Scopo di questo paragrafo sarà quello di analizzare ed esaminare alcuni risultati ottenuti da studi recenti presenti nella letteratura scientifica, provando a tracciare lo stato dell'arte di questa tecnologia e di questi nuovi metodi riabilitativi. Capire l'efficacia della realtà virtuale nel campo della riabilitazione, cognitiva o motoria, è un punto importante su cui soffermarsi.

In uno studio del 2019 preso in esame [6], l'obiettivo è proprio quello di valutare il ruolo della VR nella riabilitazione cognitiva di diverse malattie neurologiche e quanto sia fattibile per il sistema sanitario fornire questo tipo di trattamento.

I risultati mostrano che i pazienti hanno ottenuto miglioramenti significativi in molti aspetti cognitivi, tra i quali abilità esecutive e spaziali-visuali, uso della parola, attenzione e abilità mnemoniche. L'articolo supporta la tesi secondo cui la riabilitazione, svolta tramite l'utilizzo dei nuovi strumenti di realtà virtuale, può influenzare positivamente i risultati dei pazienti aumentandone la motivazione e la partecipazione. In particolare, la VR può essere usata per migliorare gli effetti della terapia convenzionale, favorendo sessioni di esercizi terapeutici di durata maggiore e diminuendo il tempo di ospedalizzazione dei pazienti.

Per quanto riguarda la parte motoria invece, risulta essere degno di nota il ruolo che le applicazioni in realtà virtuale possono avere nel processo riabilitativo e nel miglioramento delle funzioni motorie dei pazienti con danni al sistema nervoso.

In una prima revisione sistematica dell'organizzazione no-profit Cochrane<sup>2</sup> effettuata nel 2012, si è cercato di determinare l'efficienza della VR nel migliorare le funzioni e le attività degli arti superiori di pazienti post-ictus, ma i risultati sono stati poco chiari. Gli autori del documento, infatti, non hanno trovato dati dimostrativi sufficienti per affermare che la VR porti maggiori benefici sia nei casi in cui sia utilizzata in aggiunta alla riabilitazione tradizionale, sia in quelli in cui sia confrontata con essa. Tuttavia, si è notato che la realtà virtuale può portare benefici quando viene applicata nella fase subacuta della riabilitazione (nei primi sei mesi dopo l'ictus) e quando viene dedicato un tempo maggiore alle attività riabilitative. Risultati simili sono stati rilevati in una revisione successiva di Cochrane in cui invece venivano presi in esame pazienti con il morbo di Parkinson. Anche in questo caso i risultati ottenuti dagli autori non mostrano maggiori effetti positivi della VR rispetto alla fisioterapia tradizionale, in particolare per quanto riguarda gli effetti sull'equilibrio, sull'andatura e sulla qualità di vita.

Nonostante ciò, lo studio [7] che ha preso in considerazione queste due revisioni di Cochrane afferma che l'aspetto più promettente dell'uso della realtà virtuale in ambito riabilitativo è quello di poter offrire una riabilitazione multitasking e di poter ricreare in ambulatorio un ambiente reale simulato. I vantaggi offerti da queste possibilità sono: la semplicità con cui un ambiente virtuale può essere modificato e adattato al meglio a terapie individuali; i contesti divertenti e coinvolgenti con cui si può incrementare la partecipazione attiva dei pazienti; la possibilità di replicare ambienti esterni e situazioni quotidiane in ambulatorio; la possibilità di raccogliere e analizzare dati di monitoraggio in modo tale da valutare ottimamente i progressi della riabilitazione. Inoltre, è stato osservato che la riabilitazione motoria in ambiente virtuale è in grado di far aumentare in maniera esponenziale il numero di movimenti richiesti dal programma riabilitativo. Ciò è dovuto ad un maggiore coinvolgimento del paziente e ad una maggiore intensità di esercizio rispetto alla terapia tradizionale. Per ottenere tutti questi benefici è fondamentale il senso di presenza del paziente ed è pertanto necessario offrire exergames in grado di suscitare certe sensazioni, rendendoli il più possibile coinvolgenti ed immersivi.

Inoltre, è molto importante inserire diversi livelli di difficoltà negli exergames, adeguandoli accuratamente alle capacità motorie dei pazienti. Così facendo questi ultimi, avanzando tra i vari livelli,

---

<sup>2</sup> Cochrane (in precedenza denominata Cochrane Collaboration) è una associazione internazionale no-profit nata con lo scopo di raccogliere, valutare criticamente e diffondere le informazioni relative alla efficacia ed alla sicurezza degli interventi sanitari. [36]

non solo saranno spinti dal senso di sfida, ma anche dai vari successi ottenuti e saranno incentivati ancora di più nel migliorare le proprie funzioni motorie. Per di più, il completamento degli esercizi assegnati può migliorare la plasticità dei nervi motori ed il controllo muscolare.

Oltre a ciò, è stato osservato un ulteriore punto di forza della realtà virtuale, cioè la capacità di fornire un programma riabilitativo personalizzato più preciso rispetto alla terapia convenzionale, in accordo con le caratteristiche dei diversi pazienti.

In generale, molti studi evidenziano una significativa efficacia della realtà virtuale e della terapia nei casi in cui siano utilizzati gli exergames, che sono in grado di interessare positivamente le risposte neurologiche dei pazienti, dando una spinta alla motivazione e alla partecipazione, garantendo così una risposta migliore al trattamento. Si è notato che l'utilizzo della realtà virtuale in campo riabilitativo può migliorare gli effetti della terapia convenzionale e inoltre permette di eseguire sessioni terapeutiche più lunghe e di ottenere una riduzione del tempo che i pazienti devono passare nelle strutture sanitarie, alleggerendo quindi il lavoro dei terapeuti.

Secondo uno studio [8] che ha preso in considerazione 38 articoli scientifici inerenti alla riabilitazione post-Ictus, i possibili miglioramenti stimati con l'utilizzo della VR sono in media del 28.45% maggiori rispetto a non utilizzarla. Si osserva che nei primi 6 mesi di terapia essi sono maggiori del 12.82% nei casi acuti rispetto a quelli cronici, periodo nel quale entra in gioco anche il recupero spontaneo dalla patologia. Oltre a ciò, nel caso sia offerta una componente ludica (gaming) in aggiunta al semplice riscontro visuale, gli effetti tendono ad essere maggiori del 10% circa. In generale, la terapia con VR ha portato a recuperi maggiori del 10,4% rispetto alla riabilitazione convenzionale. La differenza tra le due terapie è contenuta, ma studi più recenti indicano come gli exergames siano superiori al trattamento tradizionale poiché possono aumentare la motivazione dei pazienti attraverso il raggiungimento di obiettivi di gioco ed eventualmente la raccolta di premi. Idea supportata proprio dai dati precedenti per il quale gli aspetti ludici hanno portato a benefici maggiori rispetto ad una semplice esperienza VR. È inoltre possibile che l'utilizzo di un avatar possa portare il sistema motorio del paziente a rispondere più favorevolmente alla terapia, in maniera simile a quanto accade per il mirror training o la terapia action-observation. Entrambi sono metodi con cui si cerca di recuperare le funzioni motorie del paziente, nella prima facendogli osservare i movimenti del suo arto sano come fosse quello compromesso, nella seconda facendogli osservare un'altra persona che compie determinate azioni.

Un aspetto importante, inoltre, è che gli exergames permettono una rapida alternanza sia in termini di attività richieste e sia in termini di complessità, fattore terapeutico che è stato associato ad una conservazione migliore dei risultati ottenuti. A proposito di ciò, la VR può fornire un supporto eccellente agli approcci convenzionali nel mantenimento a lungo termine dei miglioramenti clinici.

In uno studio del 2019 [9] invece, si è analizzata l'efficacia della realtà virtuale specificatamente per la riabilitazione motoria di pazienti affetti dalla malattia di Parkinson, prendendo in considerazione 16 studi scientifici sul tema. Si è dimostrato come la riabilitazione effettuata con la realtà virtuale non solo può raggiungere la stessa efficacia di quella convenzionale, ma è in grado di ottenere risultati migliori per quanto riguarda andatura, lunghezza del passo, equilibrio e mobilità. Inoltre, comparando i dati con quelli ottenuti con il gruppo di controllo, la riabilitazione VR ha dimostrato effetti significativi nel miglioramento della qualità di vita, del livello di fiducia generale del paziente e dei sintomi neuropsichiatrici. Sono stati invece registrati risultati simili nelle funzioni motorie globali, nelle attività quotidiane e nelle funzioni cognitive. È necessario però sottolineare che durante le sedute terapeutiche sono stati riscontrati rari casi di grave stordimento e vomito, mentre in altri pochi casi solo lievi capogiri. Ovviamente questi sintomi sono legati all'utilizzo della tecnologia e possono



emergere in maniera sporadica, soprattutto nelle situazioni in cui si utilizzano dispositivi VR molto immersivi.

I risultati riscontrati da questa metanalisi sono simili a quelli emersi da un altro studio preso in esame [10], in cui sono stati rilevati miglioramenti anche nell'andatura, oltre che nell'equilibrio.

Risultati simili sono stati ottenuti anche da altri studi, tra cui [11], in cui sono stati esaminati 26 articoli scientifici sul tema dell'efficacia della riabilitazione VR utilizzata su pazienti con differenti patologie. I risultati elaborati mostrano un effetto positivo degli esercizi riabilitativi basati sulla realtà virtuale in varie condizioni e per varie patologie. Dall'analisi di questi studi si evince che la realtà virtuale è stata più frequentemente usata per il miglioramento del dolore, delle capacità funzionali, della forza muscolare, della qualità della vita e della soddisfazione del paziente. In uno degli articoli analizzati è stato però riscontrato un calo del tasso di divertimento, dell'aderenza e della motivazione. Tuttavia, va fatto notare che esso riguardava la riabilitazione geriatrica, la quale non è inerente all'argomento trattato. Nei casi presi in esame, i dispositivi più utilizzati sono stati Nintendo Wii e Kinect, rispettivamente nel 41% e nel 24% dei casi. Per quanto riguarda invece i luoghi in cui si è svolta la terapia, il 42% si è svolto in clinica (o ospedale), il 35% in ambiente domiciliare e il 19% in entrambi. Lo studio conclude quindi affermando come la riabilitazione in realtà virtuale possa ottenere risultati in certi casi anche migliori rispetto a quella convenzionale e che pertanto può essere utilizzata come terapia alternativa, nei casi in cui convenga o in cui la terapia ospedaliera non sia sufficiente.

Un elemento importante da notare è che, così come affermato in altri articoli presi in esame, nella maggior parte degli studi e delle analisi effettuate non è stato svolto un vero e proprio periodo di controllo per valutare la stabilità degli effetti riabilitativi della VR nel lungo periodo. Infatti, solo cinque tra gli articoli presi in esame mostrano l'impatto positivo della realtà virtuale durante un periodo di controllo di almeno qualche settimana, in cui non è stato segnalato alcun effetto avverso, confermando la stabilità dell'efficacia della terapia VR durante il periodo riabilitativo.

Certamente altri studi sulla sua efficacia dovranno essere effettuati, ma già questi risultati, uniti ad un design delle applicazioni sempre più raffinato e dettagliato, presuppongono esiti ancora migliori nel futuro.

## Criticità riscontrate

Tuttavia, sono da tenere in considerazione le difficoltà che l'uso di questa tecnologia può portare. Infatti, interfacciarsi con un ambiente virtuale può introdurre nuove complicazioni, tra cui cinetosi digitale (cybersickness), sovraccarico cognitivo o livello di difficoltà e contenuti degli esercizi proposti inappropriati. Ad esempio, in uno studio citato in precedenza [9], sono riportati casi di cinque pazienti che hanno sperimentato capogiri durante le sessioni di terapia *prese in considerazione*, di cui uno presentava sintomi severi, incluso il vomito. Per ovviare a queste problematiche, lo sviluppo di applicazioni personalizzate e progettate appositamente per una malattia specifica può essere una soluzione, al contrario dei sistemi VR commerciali che invece possono favorire la comparsa di questi effetti collaterali.

Il vantaggio maggiore degli exergames in realtà virtuale consiste nel poter far esercizi direttamente a casa ed essere indipendenti dalla supervisione del terapeuta, almeno nelle singole sessioni di esercizio. Tuttavia, questo aspetto può presentare delle criticità che devono essere considerate: il paziente potrebbe eseguire dei movimenti compensativi per aumentare le performance di gioco e perdere di vista l'obiettivo finale degli exergames, ovvero ottenere effetti benefici dal punto di vista riabilitativo. Perciò è necessario che durante lo sviluppo del gioco si prevedano delle soluzioni per evitare che questo accada e fare in modo che eventuali movimenti compensativi non influiscano sul

punteggio di gioco. Oltre a ciò, è consigliato prevedere un monitoraggio da remoto da parte del terapeuta che può accorgersi di tali comportamenti e contattare immediatamente il paziente spiegandogli gli errori commessi.

Il trattamento terapeutico con realtà virtuale non sempre porta maggiori benefici rispetto ai trattamenti tradizionali, come dimostrato da alcuni studi citati nei testi presi in esame [9] [10]. Per esempio, una minore forza muscolare e un decremento nel tasso di appagamento dopo la terapia sono stati rilevati nei pazienti sottoposti a questo tipo di riabilitazione.

Inoltre, per i pazienti post-ictus non ci sarebbero differenze significative a livello statistico tra le due terapie nel breve periodo o durante il periodo di controllo. Pertanto, viene suggerito di analizzare gli effetti a lungo termine della riabilitazione con realtà virtuale, questione poco esaminata nella attuale letteratura. Anche prendendo in considerazione gli studi che mostrano effetti positivi della terapia in VR, non ci sono sufficienti elementi per valutare la stabilità di questi risultati sul lungo periodo [11].

Altri aspetti critici molto importanti che non vanno sottovalutati sono le risorse finanziarie e gli spazi disponibili necessari per l'utilizzo della realtà virtuale. Infatti, anche se i costi dell'hardware e del software per una VR immersiva di base sono più accessibili di un tempo, un sistema VR completamente immersivo rimane ancora costoso. Oltre a ciò, vanno considerate le spese per lo sviluppo dell'ambiente virtuale ad hoc, che dipende dal protocollo riabilitativo, e quindi costi per gli sviluppatori e i modellatori 3D. Inoltre, come accennato in precedenza, anche lo spazio disponibile e più in generale il luogo di fruizione giocano un ruolo importante per la scelta del sistema VR.

Ovviamente è anche scontato affermare che la realtà virtuale non è la Realtà, anche se spesso è un aspetto sottovalutato. Ci sono risultati che riportano che il nostro cervello reagisce in maniera differente se deve interagire con un ambiente virtuale rispetto ad uno reale [7]. Secondo gli autori dello studio è quindi necessario avere ambienti virtuali realistici per ovviare anche in piccola parte a questo problema.

Dunque, sembra chiaro come l'efficacia della realtà virtuale nella riabilitazione, sia cognitiva che motoria, può portare a significativi miglioramenti sia dal punto di vista terapeutico, sia da quello della soddisfazione del paziente e sia dal punto di vista dei costi sostenuti dal sistema sanitario. Partendo da quest'ultimo punto si è visto come, a fronte di un investimento iniziale per quanto riguarda l'hardware ed il software, la scelta di una tecnologia opportuna dia la possibilità di far svolgere gli esercizi riabilitativi a domicilio, permettendo di risparmiare ore di sessioni riabilitative in ambulatorio e di personale dedicato a questa attività.

Si è visto inoltre che i pazienti mostrano un coinvolgimento maggiore rispetto alla terapia tradizionale, soprattutto nel caso vengano proposti degli exergames e non solamente applicazioni VR di base. Puntando sempre di più su aspetti di gamification e ad ambienti virtuali più realistici e personalizzati alla terapia tutto questo non può fare altro che migliorarne la soddisfazione. La componente ludica ricopre una parte importante anche nel miglioramento dei risultati terapeutici, che riassumendo i dati presentati in precedenza si nota siano migliori rispetto ad una terapia esclusivamente tradizionale. Sono state riscontrate anche alcune criticità, o in altri termini, risultati non troppo differenti rispetto ai trattamenti tradizionali, ma l'impressione generale sembra quella che con il passare degli anni e lo sviluppo di nuove soluzioni i risultati saranno sempre più netti e concreti. Sicuramente ci sarà molto da lavorare per rendere le applicazioni in VR maggiormente user-friendly per andare in contro sia ai terapeuti sia ai pazienti meno avvezzi alla tecnologia.

## Dispositivi tecnologici

Un elemento fondamentale di cui tenere conto è la scelta del supporto tecnologico da utilizzare per la riabilitazione con realtà virtuale. Infatti, la disponibilità di dispositivi tecnologici adeguati e di applicazioni in VR può rappresentare uno scoglio molto importante da superare per i centri riabilitativi e i pazienti. Ci sono molti fattori che vanno tenuti in conto nella scelta delle tecnologie da utilizzare; tra questi rientrano sicuramente i costi, la qualità e l'efficacia del prodotto, la facilità d'uso, lo spazio necessario per il suo utilizzo, il livello di immersività offerto, la portabilità e la disponibilità di applicazioni/exergames di cui fruire.

Dai dati presenti in letteratura si evince che i dispositivi più usati in campo riabilitativo siano la Nintendo Wii e la Microsoft Kinect, in quanto strumenti efficaci, poco costosi, markerless ed entrambi portabili, quindi facilmente utilizzabili anche per la riabilitazione nel domicilio del paziente. Anche la Nintendo Wii Fit è molto comune, essa è stata utilizzata in molti studi poiché disponibile in diversi paesi ed è relativamente economica, oltre che molto conosciuta ed utilizzata. Più in generale la Nintendo Wii sembra sia molto utilizzata in combinazione con la riabilitazione tradizionale per il trattamento neurologico e cognitivo, poiché molto efficace per il miglioramento dell'equilibrio e della qualità di vita.

La Kinect invece è più spesso utilizzata per lo sviluppo di sistemi di assistenza in riabilitazione, valutazione e tecniche di miglioramento. Già la prima versione della Kinect, lanciata nel 2010 come sensore per la console Xbox 360, aveva attirato l'attenzione e acquisito popolarità nelle aree della robotica, delle gestures, della medicina e delle applicazioni riabilitative. Grazie alle sue caratteristiche, già evidenziate in precedenza, tra cui portabilità, basso costo e nessuna necessità di markers, trovò subito una nicchia di terapeuti interessati al suo utilizzo. Essa risulta ideale per poter sviluppare sistemi completi che permettono ai pazienti di eseguire a casa gli esercizi motori in un ambiente supervisionato, interattivo e motivante. Oltre a ciò, esistono una serie di vantaggi intrinseci dei sistemi in VR, che includono la configurazione della terapia, la valutazione della terapia, adattabile alle limitazioni del paziente, e un incremento dell'assistenza e del controllo nello svolgimento degli esercizi. Nonostante tutti questi punti forti, la Kinect presenta però anche alcune limitazioni. Per esempio, soffre di problemi di occlusione durante il tracciamento dei movimenti ed inoltre richiede un certo spazio di operatività, oltre che l'assenza di oggetti che interferiscano con l'acquisizione e una certa condizione di luce; presenta infatti alcuni problemi in caso di luce diretta del sole.

Valutando tutti questi aspetti però, la Kinect risulta ottima per la misurazione degli angoli dei joints dello skeleton, misure fondamentali per la definizione di certi obiettivi terapeutici. L'affidabilità di queste misurazioni è stata valutata e certificata, pertanto il sensore è stato considerato adatto ed utilizzabile per la misurazione degli angoli dei joints nelle applicazioni riabilitative [12]. Soprattutto i movimenti che presentano una buona visualizzazione per la camera offrono ottimi livelli di accuratezza. Anche trattandosi semplicemente della Kinect v1, nello studio [12] si citano vari studi in cui l'accuratezza del dispositivo è stata valutata confrontando le posizioni tridimensionali dei joints acquisite dalla Kinect con quelle acquisite attraverso tecniche tradizionali che utilizzano i marker. I risultati dimostrano che l'accuratezza dipende dal movimento e dalla posizione dell'utente. Livelli affidabili sono presenti in movimenti planari e in posizione eretta. La precisione del tracciamento delle mani invece presenta grosse limitazioni, l'accuratezza in questo caso è poco affidabile e di solito ci si affida solamente ai joints dei polsi.

La nuova versione del sensore, la Azure Kinect, è caratterizzata anch'essa da simili vantaggi e svantaggi. In uno studio del 2020 [13], il sensore è stato messo a confronto con la versione precedente, la Kinect v2, valutandone le performance durante il tracciamento di una camminata su un tapis roulant

a varie velocità. I risultati mostrano che la Azure Kinect offre un'accuratezza nel tracciamento delle traiettorie dei joint del piede significativamente maggiore rispetto alla versione precedente. Inoltre, essa presenta un numero di joints maggiore nello skeleton poiché sono stati aggiunti quelli delle clavicole e del petto, che hanno mostrato un errore di tracciamento accettabile, cioè di circa 11.5 mm. Per quanto riguarda i parametri sull'andatura è stato evidenziato che per i parametri spaziali, come lunghezza e ampiezza del passo, la nuova versione presenta un'accuratezza significativamente maggiore, probabilmente dovuta ad una migliore qualità nel tracciamento dei joints dei piedi. Sui parametri temporali invece non ci sono state differenze significative rispetto alle precedenti versioni della Kinect. Al contempo sono state invece riscontrate performance peggiori rispetto alla Kinect v2 per quanto riguarda le regioni del corpo medio-alte, soprattutto per le estremità superiori.

Un fattore negativo che può influenzare l'efficacia della terapia è che è stato studiato sperimentalmente è che la Azure Kinect presenta un Warm-up Time piuttosto elevato. Quest'ultimo consiste nel tempo necessario affinché i risultati di tracciamento ottenuti dal dispositivo siano stabili e per quanto riguarda la Kinect è stato valutato essere di almeno 60 minuti [14].

Inoltre, è stato sperimentato che in un ambiente esterno la Kinect mostra valori alti di rumore nei risultati di tracciamento, sia in caso di raggi solari diretti verso il sensore sia nel caso di raggi solari diretti verso il soggetto inquadrato. Pertanto, l'usabilità in ambienti esterni è notevolmente limitata. Si può però affermare che la luce solare diretta sul sensore non influisce sulla qualità dei risultati ottenuti; quindi, tale fenomeno può essere considerato innocuo anche nel caso in cui si verifichi in un ambiente chiuso (raggi solari che passano attraverso le finestre).

Negli esperimenti effettuati confrontando la Azure Kinect con i suoi predecessori si può affermare che in termini di precisione e ripetibilità le sue performance sono migliori di entrambe le versioni precedenti. Per quanto riguarda il Warm-up Time, il comportamento è risultato simile alla versione precedente la Kinect v2; pertanto, non si rileva nessuna perdita di qualità da questo punto di vista.

Più in generale, i punti di forza della Azure Kinect sono risultati essere il peso, dimezzato rispetto alla v2, migliore risoluzione angolare, rumore inferiore e buona accuratezza. Al contrario, gli aspetti negativi riscontrati sono stati i problemi legati ad oggetti riflettenti dovuti all'uso della tecnologia ToF, la bassa usabilità in ambienti esterni e il Warm-up time relativamente lungo (40-50 min) [14].

Uno studio del 2021 [15] si è rivelato una fonte estremamente importante, in quanto rappresenta il primo vero studio a valutare le prestazioni della Microsoft Azure Kinect rispetto ad un sistema considerato gold-standard, tra quelli di motion capture per il controllo posturale, il sistema Vicon 3D. I risultati dello studio mostrano che il dispositivo Microsoft ha un'enorme potenzialità per l'utilizzo in applicazioni fruibili in ambiente domestico e quindi anche ambulatoriale. L'errore quadratico medio (RMSE) tra i due sistemi di tracciamento è coinciso approssimativamente a 0.2 per gli esercizi laterali e frontali, mentre per gli esercizi sull'equilibrio si aggira intorno a 0.47, considerando la media dei risultati ottenuti tra tutti i joints. I joints della parte inferiore del corpo mostrano un maggior errore angolare medio rispetto a quelli della parte superiore. Inoltre, come ci si poteva aspettare, è stato rilevato che i risultati sono nettamente migliori in presenza di movimenti lenti.

In particolare, lo studio ha coinvolto 26 soggetti a cui son stati chiesti di effettuare due diversi tipi di test, ampiamente usati per valutare la postura, quali il functional reach test (FR) e il functional balance test (FB). L'obiettivo dello studio era quindi quello di dimostrare la validità dell'utilizzo della Azure Kinect nel tracciamento di questi esercizi, in modo tale da attestare l'usabilità di questo dispositivo per il controllo posturale in ambiente domestico.

Nella fase di analisi dei dati è stata evidenziata una correlazione molto alta delle curve di tracciamento della Kinect rispetto a quelle del sistema professionale, la Vicon 3D, per quanto riguarda i primi due esercizi proposti ai soggetti coinvolti nello studio, il lateral reach ed il frontal reach. Nonostante questi ottimi risultati però, il joint pelvico ha mostrato significative perdite in termini di correlazione rispetto ai dati di tracciamento del sistema Vicon, in particolare durante i movimenti che insistono sull'asse focale della Kinect. Ciò può essere dovuto alla specificità dei movimenti che in alcuni casi possono comportare all'occlusione del joint pelvico e quindi a deteriorare le performance.

I risultati del terzo esercizio invece, che riguarda la parte di studio sull'equilibrio, hanno mostrato che movimenti veloci ed improvvisi, dovuti a movimenti imprevedibili e alle reazioni personali dei soggetti alla perdita di equilibrio, non permettono alla Kinect di tracciare accuratamente i movimenti come la Vicon.

Guardando alla media delle distribuzioni del *RMSE* per lateral e frontal reach, si osserva un valore inferiore o vicino a 0.2 per tutti i joints della parte superiore del corpo. Solo in alcuni casi il valore ha superato lo 0.6. Questo tipo di degradazione nel tracciamento può essere dovuto all'occlusione del punto di vista della camera da alcune parti del corpo, di solito mani e braccia, su altre. Un'altra motivazione potrebbe essere l'uscita della mano dal cono di vista del sensore. Infatti, un aspetto molto importante da tenere in considerazione è la distanza tra soggetto e sensore in relazione all'altezza del partecipante. Una distanza troppo ridotta può incrementare le probabilità che le mani siano parzialmente o totalmente in occlusione, poiché ai limiti del cono di vista della camera.

I dati sull'*RMSE* riguardanti l'esercizio sull'equilibrio mostrano invece valori molto differenti l'un l'altro, che evidenziano come movimenti bruschi ed improvvisi possano influenzare le capacità di tracciamento dei movimenti della Kinect.

In generale, guardando i risultati dell'errore assoluto medio (*MAE*), ottenuto comparando gli angoli acquisiti con la Kinect e il sistema Vicon, emerge che la Kinect è in grado di rilevare i movimenti della parte superiore del corpo con un errore angolare più piccolo rispetto a quelli della parte inferiore, in cui invece i dati mostrano un errore angolare maggiore.

Lo studio arriva quindi ad affermare che la Microsoft Azure Kinect è senza alcun dubbio adatta e possiede un enorme potenziale per l'utilizzo in applicazioni di riabilitazione posturale in ambiente domestico. I risultati mostrano chiaramente l'elevata accuratezza nel tracciamento dei principali joints del corpo durante l'esecuzione degli esercizi di lateral reach. I principali limiti trovati durante la comparazione dei risultati di tracciamento tra Azure Kinect e Vicon 3D riguardano invece la bassa qualità del tracciamento in caso di movimenti rapidi, la perdita del tracciamento per i movimenti lungo l'asse focale e la necessità di porre attenzione alla distanza sensore-soggetto per non perdere il tracciamento di alcune parti del corpo.

La scelta della piattaforma hardware per le applicazioni in realtà virtuale, dunque, è necessariamente una delle prime questioni da analizzare, in quanto ha impatto su molteplici aspetti. Oltre alla questione economica, si devono affrontare problematiche quali mancanza di supporto tecnico, infrastrutturale e di capacità tecnologiche da parte dei terapeuti e dei pazienti, poco abili nel maneggiare tali strumenti, in particolare nelle prime fasi di interazione. Oltre a ciò, va però sottolineato l'effetto che la terapia domiciliare può avere sulla motivazione dei pazienti e sulla loro qualità di vita rispetto ad una terapia ambulatoriale, che al contrario prevede spostamenti e attese in ambulatorio, oltre a costi aggiuntivi da parte del sistema sanitario per il personale ospedaliero e per gli spazi ambulatoriali da dedicare. È quindi necessario trovare o sviluppare tecnologie VR a basso costo, in modo tale da superare la tradizionale terapia ambulatoriale, più costosa e più stressante per i pazienti. I due

dispositivi citati in precedenza, la Nintendo e la Kinect, vengono considerate all'interno di questa categoria di prodotti, almeno per quanto riguarda i paesi sviluppati. Il discorso diventa certamente differente nel caso si prendano in considerazione pazienti con reddito basso, per cui anche tali hardware diventano una spesa significativa.

È dunque importante trovare un compromesso tra costi e qualità della terapia, tenendo in conto il tipo di dispositivo, il contesto ed anche le capacità tecniche di terapeuti e pazienti [16].

## Feedback visivi

L'importanza dei feedback visivi nella riabilitazione dei pazienti post-Ictus e affetti da Parkinson è un aspetto cruciale nell'ambito della medicina riabilitativa. Queste condizioni mediche possono compromettere significativamente la mobilità e le capacità motorie dei pazienti, rendendo necessario un intervento terapeutico mirato ed efficace per migliorare la loro qualità della vita. I feedback visivi rappresentano uno strumento prezioso per facilitare il processo di recupero, poiché consentono ai pazienti di ottenere informazioni visive in tempo reale sulle proprie azioni motorie. Questi feedback non solo forniscono un mezzo per monitorare e valutare il progresso del paziente, ma agiscono anche come stimolo esterno, guidando e incoraggiando la corretta esecuzione dei movimenti. Nell'ambito della riabilitazione post-Ictus e per i pazienti affetti da Parkinson, l'integrazione di dispositivi e tecnologie che offrono feedback visivi può contribuire in modo significativo al ripristino delle funzioni motorie compromesse, promuovendo una maggiore indipendenza e autonomia nella vita quotidiana.

Proprio l'uso dei VF (Visual Feedback) è raccomandato per migliorare la riabilitazione da Ictus, poiché sono in grado di modificare positivamente i meccanismi neurali e migliorare le performance motorie. In uno studio in cui è stata utilizzata la strategia del Mirror Visual Feedback, una strategia raccomandata per forzare la riabilitazione da Ictus, per esaminare gli effetti dei feedback visuali sui pazienti post-Ictus, sono stati riscontrati miglioramenti significativi nella similarità tra arto sano e quello compromesso, sia in termini di sinergie muscolari, sia in termini di coefficienti di attivazione [17]. Il concetto delle sinergie muscolari si basa sull'ipotesi che il sistema nervoso centrale, per meglio coordinare il movimento, non attivi singolarmente i muscoli, ma dia il via invece a gruppi di muscoli che si aiutano a vicenda per svolgere attività simili. Il miglioramento delle sinergie viene quindi raggiunto poiché si riducono le differenze di peso muscolare tra gli arti. Invece, i coefficienti di attivazione rappresentano la quantità di coinvolgimento di ciascun muscolo nel processo di generazione di un movimento specifico. In questo caso, il miglioramento viene raggiunto poiché, in termini matematici, si nota una approssimazione maggiore del coefficiente di attivazione del braccio sinistro al coefficiente di attivazione del braccio destro, risultato raggiunto appunto mediante l'uso dei feedback visuali.

I risultati dello studio sono promettenti poiché l'alterazione dei coefficienti di attivazione è la principale causa della coordinazione disequilibrata causata dall'Ictus, pertanto i VF, modificando tali coefficienti, risulta ottimale per il miglioramento delle performance motorie. Inoltre, è stato suggerito che il controllo del lato paralizzato è simile al controllo di un lato sano non dominante [18]. Pertanto, è presumibile che questi risultati possano essere tradotti allo scenario di emiparesi riscontrato nell'ictus. Oltre a ciò, è stato notato che gli effetti dei VF sono inefficaci per i soggetti che trovano gli stessi feedback visuali disturbanti. Perciò, ci si aspetta che i pazienti che manifestano problemi cognitivi possano non beneficiare dell'uso dei feedback visivi.

Così come per i pazienti post-Ictus, i feedback visuali possono avere un effetto riabilitativo importante nei pazienti con malattia di Parkinson, che infatti rispondono meglio agli stimoli esterni di movimento.

Questi effetti sono stati esaminati in uno studio del 2014 che ha dimostrato come i feedback visuali in tempo reale possano portare miglioramenti nella deambulazione dei pazienti, senza la necessità di apportare alcune modifiche al loro piano terapeutico [19]. Venti pazienti con malattia di Parkinson hanno partecipato allo studio, il cui obiettivo era quello di esaminare gli effetti dei feedback visuali sulla capacità di camminata forniti attraverso un dispositivo di realtà virtuale portatile e indossabile. I risultati ottenuti hanno mostrato che il 56% dei pazienti ha migliorato la velocità di camminata, la lunghezza del passo o entrambe, di oltre il 20%. Anche dopo la rimozione del dispositivo e un intervallo di 15 minuti il 68% dei pazienti ha mostrato un miglioramento simile. Inoltre, dopo una settimana di test, il 36% dei pazienti ha mostrato un miglioramento del 20% rispetto al test precedente. In sintesi, lo studio mostra che, seguendo una terapia con la realtà virtuale, i pazienti affetti dal Parkinson esprimono un miglioramento significativo nelle loro abilità deambulatorie. Tali risultati sono in linea con un altro caso di studio in cui è stato seguito un singolo soggetto in una terapia di un mese in cui le indicazioni visuali venivano poste sul pavimento [20]. Oltre a ciò, un aspetto incoraggiante che viene evidenziato è un miglioramento persistente e significativo sia della lunghezza del passo, sia della velocità della camminata, con solamente un declino leggero con il passare del tempo. Infatti, molti pazienti hanno riferito di rivivere nella quotidianità la sensazione di camminare nell'ambiente virtuale propostogli durante la sperimentazione. Essi rivedevano nella loro testa le indicazioni visuali che gli erano stati proposti. Questo "processo di apprendimento" è supportato da alcuni studi su animali [21], i quali riferiscono come i gangli della base, che sono un gruppo di nuclei subcorticali presenti nel cervello dei vertebrati, associati a una varietà di funzioni, tra cui il controllo dei movimenti volontari, forniscano stimoli interni non-specifici per attivare i movimenti, implicando quindi che i pazienti Parkinsoniani riportino una deficienza in questi stimoli. Pertanto, essendo che questo tipo di pazienti tipicamente si affidano a stimoli visuali esterni, è possibile che questi stimoli perpetuati nel tempo abbiano impresso nella mente degli stimoli interni, creando una specie di "memoria degli stimoli" che aiuta a mantenere certe abilità motorie.

Dunque, le indicazioni visuali possono rafforzare la correttezza del comportamento motorio del paziente, il mantenimento di un certo livello di azione ed anche il suo entusiasmo, oltre ad una buona esperienza emotiva. Tutto ciò non fa che rafforzare l'ipotesi secondo cui la realtà virtuale possa essere uno strumento efficace da utilizzare nelle terapie riabilitative motorie in quanto oltre ad essere visuale per "definizione", essa può includere facilmente tutta una serie di feedback specifici che possano stimolare al meglio il paziente. Ovviamente ciò richiede varie sessioni di prova e un confronto diretto tra terapeuti e sviluppatori per la definizione di strumenti corretti. Inoltre, molti test presenti negli studi esaminati dimostrano che i pazienti possono apprendere le capacità richieste per svolgere gli esercizi della terapia in un mondo virtuale e applicarle in seguito alla vita reale. Anche in questo studio citato in precedenza si suggerisce di utilizzare la tecnologia della realtà virtuale come trattamento a lungo termine, in aggiunta alla terapia fisica, per mantenere la deambulazione e le capacità posturali dei pazienti con Parkinson [19].

La terapia convenzionale inoltre risulta monotona e tediosa per i pazienti, in più dopo la sessione terapeutica non si riescono ad integrare gli esercizi nella vita di tutti i giorni. La realtà virtuale permette invece di sfruttare minigiochi per aumentare la partecipazione e premiare i pazienti al completamento di un compito. Tutto ciò implica che il paziente attivi varie funzioni cerebrali, tra cui elaborazione degli input sensoriali, giudizio cerebrale ed integrazione dell'informazione, oltre all'effettivo controllo dei nervi. In più le applicazioni in realtà virtuale possono includere vari tipi di contenuti multimediali, come immagini e suoni, che uniti ai feedback visuali incrementano l'attenzione del paziente e lo stimolano ad avere meno timore della terapia, indirizzandolo verso la guarigione. L'ambiente virtuale è in grado di rendere il trattamento divertente e migliorare l'ottimismo del paziente.

L'unione con la terapia convenzionale può risolvere molti problemi e limitazioni di quest'ultima e far risparmiare anche personale. La tecnologia VR, infatti, non solo fornisce un ambiente virtuale per l'esecuzione degli esercizi riabilitativi, ma permette anche di quantificare lo stato funzionale dei pazienti, sia prima che dopo la sessione riabilitativa.



# Metodi

## Panoramica esercizi riabilitativi

In questo capitolo verranno presentati gli esercizi motori riabilitativi che sono alla base degli exergames sviluppati. Inizialmente verranno esposte le caratteristiche generali degli obiettivi di riabilitazione motoria, in riferimento alle patologie considerate nel progetto. In seguito, si descriveranno le diverse soluzioni tecnologiche disponibili per superare le problematiche relative alla valutazione oggettiva ed automatica delle prestazioni motorie, elemento fondamentale per analizzare e tenere traccia nel tempo l'evoluzione patologica o i miglioramenti ottenuti da un trattamento riabilitativo personalizzato.

## Esercizi motori nella malattia di Parkinson e post-Ictus

La malattia di Parkinson è una patologia con andamento cronico e degenerativo, in cui la disfunzione motoria, effetto della sintomatologia che colpisce i diversi distretti corporei, ne è l'elemento più caratterizzante. Infatti, a causa della mancanza di un test diagnostico definitivo, i clinici richiedono una conoscenza scrupolosa delle manifestazioni cliniche della malattia, per aiutarli a differenziarla da altri disturbi collegati. I principali sintomi riguardano bradicinesia (eccessiva lentezza nei movimenti), ipocinesia (limitazione dell'ampiezza dei movimenti), acinesia (mancanza di movimenti), tremore, rigidità ed instabilità posturale [22]; tutti aspetti che sono destinati ad un progressivo peggioramento dovuto alla neuro-degenerazione cellulare. La conseguenza è la compromissione funzionale che pregiudica il movimento dalla fase di pianificazione a quella di esecuzione, che si evidenzia principalmente con disabilità a livello di controllo e coordinamento motorio [23].

I postumi di ictus sono invece un esempio di disabilità motoria conseguente ad una patologia acuta. Tra le possibili conseguenze vi sono emiparesi laterale di braccio, gamba, volto, o nei casi più gravi di metà del corpo, difficoltà di deambulazione e di mantenimento della postura. L'emiplegia è una sindrome caratterizzata clinicamente da deficit dell'attività motoria volontaria di una metà del corpo, che sopravviene in seguito ad una lesione situata generalmente nell'emisfero cerebrale opposto all'emisoma affetto da paralisi oppure, sempre contro-lateralmente, nel tronco encefalico. Quasi mai l'emiplegia si presenta come pura invalidità motoria: ad essa, infatti, spesso si associano deficit sensitivi di tipo centrale, deficit delle funzioni di relazione (es. perdita della parola) e disturbi dello schema corporeo. Alcuni studi riportano che la maggior parte dei soggetti sopravvissuti non riesce ad utilizzare efficacemente l'arto superiore compromesso nell'esecuzione delle attività quotidiane a distanza di 6 mesi dall'evento scatenante [24] [25].

In entrambi i casi, la qualità della vita è fortemente compromessa dal grande impatto negativo che la disabilità motoria comporta, limitando l'autonomia e l'indipendenza a causa della sensazione di insicurezza nello svolgere anche le più semplici attività quotidiane. La riabilitazione motoria svolge perciò un ruolo cruciale per il miglioramento della qualità di vita e ha necessità di essere continua per mostrare progressi evidenti; inoltre deve essere seguita fin dall'esordio della patologia o della lesione, per proseguire poi nel corso della vita dell'individuo. Per questo motivo lo sviluppo tecnologico degli ultimi decenni si è mosso nella ricerca di nuovi ed opportuni programmi di riabilitazione remota, sfruttando ad esempio le potenzialità della realtà virtuale [26] [27] [28] [29]. Il progetto ReHome, di cui gli exergames fanno parte, ha infatti l'obiettivo di realizzare una piattaforma di monitoraggio remoto e di riabilitazione in grado di soddisfare i bisogni riabilitativi del paziente, quali ad esempio la stimolazione del controllo e della coordinazione motoria, e le esigenze cliniche dei medici, che hanno la necessità di monitorare le alterazioni motorie dei pazienti. In questo modo si vuole favorire la

continuità assistenziale in ambito domiciliare, seguendo allo stesso tempo un piano terapeutico personalizzato.

Per la definizione degli esercizi motori sono state considerate alcune delle principali caratteristiche di compromissione motoria che caratterizzano le due patologie in esame, tenendo conto dei vari obiettivi della riabilitazione “tradizionale” abbinata ad esercizi definiti “ecologici”, ovvero che si rifanno ai comportamenti della vita quotidiana, e dei vantaggi di un suo svolgimento in un contesto domiciliare.

La piattaforma motoria realizzata per il progetto è composta da due componenti fondamentali: una componente riabilitativa, finalizzata alla stimolazione motoria, ed una componente valutativa, finalizzata alla valutazione dei progressi e delle alterazioni del comportamento motorio abituale. Gli exergames rientrano proprio nella prima componente, quella riabilitativa, e sono infatti finalizzati all’esecuzione e alla ripetizione di movimenti specifici che coincidono con esercizi motori di rilevanza clinica. Sfruttando l’ambiente ludico che riescono ad offrire, essi hanno lo scopo di stimolare l’individuo ad eseguire i movimenti riabilitativi e di monitorare da remoto eventuali miglioramenti o peggioramenti, favorendo in questo modo un rapido e pronto intervento dei terapeuti. Inoltre, sono stati progettati con vari livelli di difficoltà per soddisfare alcuni requisiti di gamification, in modo tale da rendere il gioco più interessante e stimolante, invogliando il paziente al raggiungimento di nuovi obiettivi terapeutici e ludici, ovviamente sempre rispettando le abilità funzionali del singolo paziente [30].

### Malattia di Parkinson

Nel caso della malattia di Parkinson, il trattamento riabilitativo comprendente gli esercizi motori ha un ruolo complementare al trattamento farmacologico dei sintomi. La fisioterapia riveste infatti un ruolo fondamentale per massimizzare la qualità del movimento, l’indipendenza funzionale ed il benessere generale; oltre a ciò, è in grado di minimizzare le possibili complicazioni secondarie e di aumentare la sicurezza dei pazienti [2]. La terapia riabilitativa tradizionale ha quindi l’obiettivo di ottimizzare le funzionalità motorie residue, prevenendo le conseguenze dirette ed indirette legate al progressivo deterioramento motorio, che possono coincidere con l’aumento del rischio di cadute, l’inattività motoria e l’isolamento sociale. L’opportunità di seguire un trattamento in un contesto domiciliare, più agevole e familiare, può dunque rivestire un ruolo chiave nel proseguire l’attività sul controllo e sul coordinamento motorio attraverso esercizi mirati e stimolanti dal punto di vista fisico, favorendo l’acquisizione di una maggiore sicurezza nei movimenti e sul mantenimento di uno stile di vita attivo, indipendente ed autonomo, con conseguente impatto positivo sullo stato psico-fisico generale del paziente.

Gli exergames interesseranno le funzionalità del tronco e degli arti superiori, stimolandone il controllo e la coordinazione. Questa scelta è motivata principalmente dalla necessità di sollecitare l’equilibrio e la stabilità posturale attraverso una stimolazione multi-distrettuale, coinvolgendo sia il tronco che gli arti. Inoltre, favorisce il multi-tasking, poiché implica interazioni motorie e cognitive simultanee.

### Postumi di Ictus

Nell’ambito del post-ictus invece, la terapia riabilitativa e l’esercizio fisico hanno un ruolo fondamentale nel recupero funzionale della parte lesa [3]. L’obiettivo della riabilitazione in questo caso è quello di recuperare parzialmente o totalmente le funzionalità motorie generali e quelle specifiche della parte del corpo affetta da paralisi. Questo è possibile grazie alla definizione di un percorso di riapprendimento delle abilità funzionali primarie; in questo modo si è in grado di restituire

al paziente autonomia e indipendenza nelle attività quotidiane. La possibilità di fruire di un trattamento domiciliare può rivestire un ruolo fondamentale nel proseguimento del recupero funzionale attraverso una adeguata e continua stimolazione, consentendo di migliorare o di mantenere nel tempo le funzionalità riacquisite attraverso la fisioterapia tradizionale e di evitare il “learned nonuse” [4], cioè un fenomeno causato dal “non uso” volontario dell’arto riabilitato, che porta inevitabilmente al decadimento funzionale.

In questo caso gli exergames si rivolgono alla stimolazione della funzionalità dell’arto superiore compromesso ed al controllo posturale, migliorando la destrezza e l’ampiezza di movimento dell’arto, insieme alla coordinazione generale del paziente. Ciò verrà ottenuto attraverso stimolazioni specifiche e coordinate dell’arto in questione e mediante varie sollecitazioni per il mantenimento di una postura corretta, entrambi aspetti fondamentali nella vita quotidiana.

## Caratteristiche principali exergames riabilitativi

Durante la fase iniziale del progetto, sono stati identificati alcuni aspetti in comune tra malattia di Parkinson e post-Ictus che potessero essere utilizzati come punto di partenza per lo sviluppo degli exergames di riabilitazione motoria. La decisione è stata quella di focalizzarsi su due elementi in particolare: il recupero del controllo e del coordinamento motorio dell’arto superiore compromesso, elemento fondamentale per la vita quotidiana, ed il recupero del controllo posturale del tronco, particolarmente importante per gli aspetti legati all’incolumità ed alla sicurezza della persona durante lo svolgimento delle attività quotidiane.

Successivamente, dopo aver determinato gli elementi caratterizzanti del programma riabilitativo, sono stati definiti alcuni movimenti specifici per stimolare e sollecitare le funzionalità delle aree individuate in precedenza. Questi movimenti saranno alla base degli exergames che verranno sviluppati. Sono state anche individuate alcune linee guida, requisiti e caratteristiche che sono ritenute fondamentali per questo nuovo tipo di trattamento riabilitativo. Le principali indicazioni per lo sviluppo degli exergames hanno riguardato:

- *Utilizzo di feedback positivi*: elemento fondamentale di qualsiasi gioco, un feedback positivo risulta essenziale per non scoraggiare il paziente a raggiungere gli obiettivi prefissati attraverso lo strumento. Al contrario gli insuccessi dovranno limitarsi al non raggiungimento dell’obiettivo di gioco, incoraggiando al tempo stesso a ripetere l’esercizio fino all’esecuzione corretta del movimento richiesto.
- *Presenza di un tutorial*: ogni gioco prevede una fase iniziale che illustra il movimento corretto da eseguire
- *Utilizzo di avatar*: ogni gioco prevede un avatar che rispecchi i movimenti reali eseguiti dal paziente e che permetta di avere un riscontro in tempo reale del movimento eseguito. È importante, inoltre, che sia presente meno latenza possibile per non creare confusione e per suscitare quelle sensazioni di immersione e di controllo su quello che avviene nel mondo virtuale.
- *Feedback visivo*: ogni gioco prevede un riscontro visivo del movimento reale eseguito dal paziente.
- *Stimoli sonori*: è previsto l’utilizzo di suoni per aumentare la sensazione di immersione e per ricevere feedback di gioco.

- *Livelli di gioco*: ogni gioco prevede livelli a difficoltà crescente e parametri modificabili sulla base delle capacità motorie del paziente. Un esempio può essere la velocità di gioco che può essere adeguata in base al livello di compromissione motoria.
- *Gestione remota*: sulla base dei risultati ottenuti, il terapeuta è in grado di stabilire da remoto il passaggio ad un livello successivo o ad uno inferiore, in modo da non indurre stress nel paziente.

### Specifiche movimenti riabilitativi

Dunque, in base ai movimenti ritenuti opportuni dai terapeuti per la sollecitazione delle aree di interesse discusse in precedenza ed in base ai parametri indicati anch'essi precedentemente, sono state definite le specifiche per la realizzazione degli exergames. Come già indicato in precedenza, insieme ai clinici e ai fisioterapisti sono state individuate le zone corporee oggetto della stimolazione motoria ed i movimenti da eseguire per sollecitare specifiche funzionalità motorie. La scelta è ricaduta sulla stimolazione di tronco ed arti superiori, per favorire un miglioramento nel coordinamento e nel controllo motorio, con potenziali benefici in termini di controllo posturale e di maggiore mobilità degli arti superiori nelle attività quotidiane. Per la definizione dei movimenti inoltre è stato considerato il fatto che i movimenti previsti possano essere facilmente eseguiti in un contesto non-supervisionato, cioè quello domestico, garantendo al tempo stesso la sicurezza della persona.

### Sci di Fondo

L'exergame Sci di Fondo, che verrà successivamente presentato più in dettaglio per quanto riguarda gli aspetti tecnici e di game design, prevede che il giocatore comandi un avatar, un pupazzo di neve – sciatore, all'interno di una pista di sci di fondo. L'obiettivo di ogni gara sarà giungere al traguardo nel minor tempo possibile, raccogliendo il maggior numero di oggetti-bonus possibile e cercando di non ottenere alcun malus.

Per quanto riguarda gli aspetti riabilitativi invece, in questo exergame è stato deciso di sollecitare il tronco e gli arti superiori attraverso l'esecuzione di movimenti ritmici alternati e paralleli degli arti superiori, in cui questi ultimi sono mantenuti sollevati all'incirca ad altezza spalle e vengono distesi e ritratti in maniera alternata. Nonostante risulti semplice, l'esercizio agisce su più aspetti riabilitativi stimolando la coordinazione motoria, la forza, la mobilità e l'equilibrio posturale. Oltre all'aspetto motorio, l'esercizio offre anche uno stimolo cognitivo, poiché richiede al paziente di concentrarsi attentamente per eseguire nel modo più corretto possibile il movimento delle braccia all'interno di un contesto ludico virtuale. Infatti, sarà necessario prestare attenzione alle varie circostanze di gioco e reagire in modo adeguato agli stimoli proposti. Attraverso il movimento alternato delle braccia, il paziente farà procedere lungo la pista l'avatar, che rispecchierà i movimenti degli arti nell'ambiente virtuale muovendo in maniera alternata gli sci. Oltre a ciò, il paziente potrà controllare la direzione di spostamento dell'avatar ruotando le braccia lateralmente, mantenendo nel frattempo il movimento alternato in avanti ed indietro.



**FIGURA 1 - ESERCIZIO RIABILITATIVO SCI DI FONDO**

### Aeroplano

L'exergame Aeroplano, che anch'esso verrà esposto in maniera più dettagliata in seguito, prevede invece che il giocatore comandi un aeroplano in un ambiente virtuale caratterizzato da diversi ostacoli. L'obiettivo di ogni volo sarà passare attraverso degli anelli blu posti nello spazio di gioco ed arrivare al termine del "corridoio" aereo disponibile per l'esercizio.

In questo caso la sollecitazione di tronco ed arti superiori avviene eseguendo movimenti di flessione laterale ed antero-posteriore del tronco, unito all'apertura laterale delle braccia, simulando le ali di un aereo. Questo movimento permette di migliorare la coordinazione motoria, la forza degli arti superiori, la postura e la mobilità di testa, tronco, spalle e bacino. Anche in questo caso l'aspetto motorio si accompagna a quello cognitivo. La corretta esecuzione del movimento durante la sessione di gioco, unita alla scelta e al ragionamento su quale traiettoria seguire per evitare gli ostacoli e i malus presenti nella scena, richiede concentrazione e abilità nel controllo dell'aereo. Ovviamente, l'inclinazione dell'aereo rispecchierà i movimenti effettuati, corrispondendo a quella delle braccia del paziente.



**FIGURA 2 - ESERCIZIO RIABILITATIVO AEREO**

## Tastiera

L'exergame Tastiera prevede che il giocatore, attraverso l'utilizzo di una mano virtuale, prema i pulsanti di una tastiera anch'essa virtuale, seguendo un ordine proposto e commettendo meno errori possibili. La mano virtuale rispecchierà e si muoverà in base al movimento della mano reale del paziente.

Anche per questo exergame gli aspetti tecnici verranno trattati in seguito.

Per quanto riguarda invece l'aspetto riabilitativo, in questo caso si è deciso di sollecitare solamente gli arti superiori, uno alla volta, mediante l'esecuzione di movimenti di estensione frontale e di posizionamento, che sollecitino il controllo e la coordinazione motoria, nonché la precisione del movimento. In questo modo si riesce anche a migliorare la forza degli arti superiori e la postura di testa e tronco in relazione alle braccia. Inoltre, è presente, come negli altri exergame, l'aspetto cognitivo riabilitativo, in quanto il paziente dovrà porre attenzione sostenuta e selettiva per eseguire al meglio il movimento e prendere la decisione corretta sul tasto da cliccare. Da notare che anche la reattività viene sollecitata vista la necessità di premere il tasto richiesto il prima possibile.



**FIGURA 3 - ESERCIZIO RIABILITATIVO TASTIERA**

## Parametri statici e cinematici

Un aspetto fondamentale degli exergames è costituito dalla raccolta di dati sugli esercizi e sui movimenti svolti dai pazienti. In particolare, si valuterà la prestazione motoria mediante la raccolta di parametri statici e cinematici che possano essere confrontati nel tempo per rilevare eventuali alterazioni del comportamento motorio abituale, anomalie e miglioramenti legati alle attività riabilitative svolte. In sintesi, si cerca di monitorare il lavoro dei pazienti con dati oggettivi che i terapisti possono utilizzare per effettuare analisi cliniche e per valutare il percorso riabilitativo.

## Panoramica exergames

Lo scopo finale del progetto è lo sviluppo di tre exergames che siano facilmente utilizzabili dai pazienti sia in ambiente ambulatoriale sia in ambiente domiciliare, integrandosi con le terapie ospedaliere. Gli exergames sono videogiochi progettati non solo per intrattenere ma anche per coinvolgere il giocatore in esercizi motori o stimolare reazioni fisiche. Questi exergames in particolare si basano su tecnologie che tracciano e identificano i movimenti corporei dell'utente.

## Progetto ReHome

Lo sviluppo di questi exergames si inserisce nel progetto di ricerca "ReHome", finanziato da Regione Piemonte, che ha come obiettivo quello di definire, sviluppare, prototipare e validare una piattaforma tecnologica in grado di integrare diverse componenti che soddisfano i bisogni riabilitativi motori e cognitivi in un contesto di continuità assistenziale rivolta in particolare agli individui affetti da tre patologie croniche degenerative: il Disturbo Cognitivo Grave (mNCD), Ictus e Morbo di Parkinson.

La tesi si inserisce in questo contesto e in particolare concerne la riabilitazione motoria dei pazienti affetti da Ictus e Morbo di Parkinson. Più nel dettaglio, i tre exergames faranno parte della piattaforma tecnologica citata in precedenza e potranno essere avviati a partire dall'interno di essa, coerentemente ad un piano terapeutico stilato da un medico terapeuta, o in maniera stand-alone. Si tratta infatti di eseguibili (\*.exe), sviluppati per l'ambiente Windows e realizzati mediante l'utilizzo del motore grafico Unity.

## Unity

Unity è un motore grafico ampiamente utilizzato nello sviluppo di videogiochi e applicazioni interattive. Si distingue per la sua versatilità e facilità d'uso, consentendo agli sviluppatori di creare ambienti tridimensionali, simulazioni virtuali ed esperienze immersive. Unity offre un'ampia gamma di strumenti e risorse per la creazione di contenuti visivi e interattivi, con un focus sulla facilità di apprendimento e implementazione. Grazie alla sua popolarità e alla vasta comunità di sviluppatori, Unity è diventato uno standard nell'industria del gioco e oltre, fornendo una piattaforma accessibile per la realizzazione di progetti creativi e innovativi. Una delle caratteristiche distintive di Unity risiede nelle sue capacità cross-platform, consentendo agli sviluppatori di distribuire senza problemi le applicazioni su varie piattaforme, tra cui PC, dispositivi mobili, console e web. Questa versatilità intrinseca posiziona Unity come una scelta strategica per raggiungere un vasto pubblico. L'ambiente di authoring visuale intuitivo facilita la manipolazione di asset, luci e telecamere in tempo reale, semplificando il processo di progettazione delle scene.

## Sistemi di tracciamento e dispositivi di input

Come già accennato in precedenza, per gli exergame è fondamentale avere un sistema di tracciamento in grado di riconoscere i movimenti dell'utente e mandare in input queste informazioni al software del gioco. I dispositivi in grado di fornire queste funzionalità sono chiamati "Trackers" e hanno la capacità di catturare la posizione e l'orientamento di oggetti reali, nonché il movimento dettagliato del corpo umano. La scelta del tracker deve essere dettata dalla qualità dei dati rilevati, con particolare attenzione alla frequenza, all'intervallo e alla precisione dell'acquisizione, dal DOF (Degree of Freedom) degli oggetti tracciati e dal costo. In questo caso specifico, quest'ultimo assume un'importanza maggiore, in quanto si deve disporre di un dispositivo che deve essere fornito ad un numero considerevole di pazienti da parte delle istituzioni sanitarie.

Altri fattori importanti che sono stati tenuti in considerazione per la scelta del tracker sono la semplicità di utilizzo e di installazione in un ambiente domiciliare e la non invasività per l'utilizzatore. È fondamentale che queste caratteristiche vengano soddisfatte in quanto l'utilizzo degli exergames



non deve creare stress ulteriore ai pazienti, che al contrario devono essere incentivati e invogliati a sfruttare questa tecnologia.

I principali sistemi di tracciamento e di analisi del movimento possono essere scomposti in quattro categorie: i sistemi ottici marker-based e marker-less, quelli basati su sensori indossabili (meccanici) e le applicazioni di computer vision per smartphone, a cui vanno aggiunti anche i sistemi magnetici ed inerziali. La cattura del movimento da parte dei sistemi ottici si basa su tecniche di Computer Vision che permettono di elaborare le immagini acquisite dal dispositivo per ricavarne specifiche informazioni, che nel caso in questione sono relative al movimento corporeo. Ciò può avvenire mediante l'applicazione sul corpo del soggetto di speciali marker che vengono riconosciuti dai dispositivi (sistemi marker-based) e che vengono utilizzati come riferimenti puntuali per l'elaborazione della posizione del corpo e di conseguenza dei movimenti. Grazie all'utilizzo dei marker, appositamente applicati in punti di interesse per essere registrati, questa tecnologia assicura una precisione superiore alle altre tecniche di cattura dei movimenti ed è possibile rilevare anche dettagli minimi con massima fedeltà. Inoltre, ci sono differenze anche sui marker utilizzabili, che possono essere marker passivi, cioè che riflettono la luce, o marker attivi, che invece emettono luce. In base alla tipologia scelta ovviamente saranno richiesti dispositivi differenti per identificare la posizione dei marker. Con l'utilizzo di marker passivi, per esempio, è necessario disporsi di un emettitore luminoso, solitamente a luce infrarossa, che dovrà essere posizionato opportunamente nell'ambiente di lavoro.

Una alternativa a questi sistemi è quella invece di utilizzare un sistema marker-less, cioè senza marker, soluzione adottata nel progetto ReHome e quindi anche in questo progetto di tesi. In particolare, si utilizza un dispositivo RGB-Depth che è in grado di garantire non-invasività, usabilità, anche senza particolari competenze tecniche, e versatilità di applicazione, risultando perciò particolarmente adatto per un utilizzo in ambito domiciliare. Da segnalare il fatto che i sistemi marker-based sono stati utilizzati all'interno del progetto ReHome per la validazione delle soluzioni e degli algoritmi implementati, al fine di verificarne la robustezza e l'accuratezza nella cattura del movimento.

### Sistemi marker-based

I sistemi ottici marker-based sono sistemi complessi e multi-camera che si basano sui principi dell'optoelettronica e della stereofotogrammetria. Essi si basano sull'utilizzo di telecamere operanti nella gamma del visibile o dell'infrarosso che garantiscono un'accuratezza elevata e di marcatori speciali (marker) posti in punti di interesse nel volume di lavoro del sistema stesso. In particolare, nel caso della cattura del movimento corporeo, i marker vengono posti su punti specifici del corpo del soggetto di cui verranno catturati i movimenti. Essi possono essere passivi o attivi. I primi sono costituiti da materiale altamente riflettente e necessitano l'utilizzo di emettitori luminosi in posizioni fisse, di solito a luce infrarossa (IR). In questo modo la luce riflessa creerà delle aree più luminose nell'immagine ripresa dalle telecamere. Per ottenere la posizione 3D è poi necessario effettuare una triangolazione sfruttando la stereofotogrammetria, ovvero inquadrando il soggetto con due o più telecamere in posizione fissa secondo una geometria prestabilita.

Per quanto riguarda i marcatori attivi invece, essi sono costituiti da LED emissivi, spesso ad infrarossi, la cui luce viene catturata da speciali sensori che costituiscono il sistema. Per semplificarne l'identificazione, ogni singolo marker può emettere luce a frequenze diverse o luce modulata a frequenze diverse; questa seconda opzione richiede però l'utilizzo di telecamere con elevato frame rate.

Nell'ultimo decennio i sistemi optoelettronici sono diventati sempre più accurati ed automatizzati, venendo così utilizzati in tantissimi settori, tra cui il cinema, lo sport e la sanità. Essi sono infatti considerati il riferimento per quanto riguarda l'analisi del movimento nell'ambito clinico, grazie alla



loro precisione e accuratezza nel tracciamento motorio. Ne è un esempio il loro utilizzo in diversi scenari patologici, come nell'analisi delle disabilità motorie durante il cammino in alcune sindromi genetiche [31] o nella valutazione degli effetti della stimolazione transcranica sul cammino [32].

Tuttavia, l'uso di questi sistemi è limitato poiché richiedono risorse economiche importanti per l'acquisto, ampi spazi dedicati e la supervisione di tecnici qualificati per la gestione del sistema, la calibrazione e l'applicazione di un numero elevato di marker. A causa di questi svantaggi essi sono generalmente più utilizzati in ambienti di ricerca o clinici.

Dunque, considerando tutti questi aspetti ed i recenti sviluppi tecnologici, negli ultimi anni si è ricorso sovente all'utilizzo di tecnologie alternative, meno costose e portabili, che possano essere utilizzate al di fuori dei soli ambienti ambulatoriali o di laboratorio, pur mantenendo accuratezza e consistenza con le misure di riferimento ottenute dai sistemi optoelettronici. Tra queste vi sono i sistemi ottici marker-less che verranno descritti nel prossimo paragrafo.

### Sistemi ottici marker-less

La ricerca di soluzioni alternative a quelle marker-based ha portato negli ultimi tempi a favorire i sistemi marker-less, che in seguito alla recente evoluzione tecnologica riescono a garantire soluzioni più economiche, meno ingombranti e meno invasive, pur offrendo prestazioni ed accuratezza confrontabili con i sistemi di riferimento. Nell'ambito dei dispositivi ottici, la vera rivoluzione è avvenuta con l'uscita dei dispositivi RGB-Depth (o RGB-D), tra i quali Microsoft Kinect fu il primo ad uscire sul mercato nel 2010. Inizialmente questi dispositivi si rivolgevano al settore del gaming, dove però non riscosero grande fortuna. Nonostante ciò, suscitavano grande interesse nei settori della Computer Graphics e nella Computer Vision, dove in seguito trovarono ampio spazio di utilizzo, comprendendo anche altri contesti, tra i quali proprio quello medico-sanitario, in particolare grazie a due aspetti innovativi: la possibilità di ottenere facilmente ricostruzioni e misure tridimensionali e la disponibilità di modelli scheletrici per la cattura del movimento corporeo in tempo reale, senza l'ausilio di strumentazioni invasive.

La differenza rispetto ad altri dispositivi ottici in grado di fornire solo immagini a colori (dispositivi RGB) è che i dispositivi RGB-Depth sono in grado di fornire anche informazioni di profondità. Ogni pixel dell'immagine è caratterizzato, oltre che dalle informazioni di colore, anche da un valore di profondità, che identifica la distanza stimata dal dispositivo. In particolare, l'informazione di profondità o la mappa di profondità viene calcolata attraverso due metodologie: la luce strutturata, la prima tecnologia utilizzata, e la tecnica del tempo di volo (ToF), utilizzata nei modelli più recenti. Avendo a disposizione questa informazione, è molto più semplice effettuare misurazioni tridimensionali senza dover ricorrere a sistemi multicamera più complessi. Le funzionalità offerte da questi ultimi sono racchiuse in un unico dispositivo, compatto e di facile utilizzo, grazie alla presenza di due componenti fondamentali quali il Color Sensor ed il Depth Sensing System. Inoltre, il problema della calibrazione, tipico dei sistemi multicamera, non sussiste in quanto i sensori hanno posizione fissa e la calibrazione è effettuata direttamente dai costruttori. In sintesi, i sistemi ottici marker-free basati su dispositivi RGB-Depth hanno il punto di forza di essere non invasivi, relativamente economici, di dimensioni contenute e quindi facilmente portabili.

Diversi studi hanno dimostrato l'efficacia e l'accuratezza dei sistemi ottici per il tracking in ambito clinico [15] [16]. In particolare, i dispositivi RGB-Depth sono già stati utilizzati a supporto di soggetti affetti da malattia di Parkinson (PD) per monitorare le funzionalità motorie, per la riabilitazione motoria, per l'analisi di instabilità posturale e dell'equilibrio, per la valutazione del cammino ed il rilevamento delle sue anomalie, per l'identificazione di pattern cinematici di soggetti diversi, per l'hand tracking e per il rilevamento del rischio associato alle cadute.

All'interno della categoria dei dispositivi RGB-Depth ricade la Microsoft Kinect Azure DK, ultimo modello della Microsoft Kinect uscito sul mercato nel 2019, è considerato il dispositivo più all'avanguardia tra i sensori RGB-Depth. Recenti studi [14] hanno già evidenziato la maggiore accuratezza del nuovo modello rispetto ai predecessori, sia a livello di sensoristica ma soprattutto per quanto riguarda l'algoritmo di body tracking. Per questi motivi, è stato scelto come dispositivo ottico per il progetto ReHome ed è stato utilizzato nell'ambito della tesi. La scelta è stata motivata anche dai risultati ottenuti con i modelli precedenti (Kinect v1 e v2), già ampiamente utilizzati per l'analisi del movimento in ambito clinico. Inoltre, vista la necessità di un utilizzo sia in scenari ambulatori o ospedalieri sia in ambito domiciliare, in cui non siano richieste esperienza o supervisione tecnica motivano maggiormente la scelta. La Kinect, infatti, essendo un dispositivo marker-free, compatto e non-invasivo, garantisce portabilità e facilità di utilizzo ed è utilizzabile in ambienti diversi e su un numero elevato di pazienti.

### Microsoft Azure Kinect DK

Il dispositivo Azure Kinect DK viene annunciato da Microsoft nel 2019 per essere il sensore RGB-Depth di nuova generazione. Le aspettative sono state sin da subito molto elevate a livello mondiale e a differenza dei modelli precedenti, che erano stati progettati per essere utilizzati come accessorio delle console di gioco, in particolare per Xbox ed Xbox One, Kinect Azure DK è stata progettata come dispositivo indipendente per sfruttare servizi basati sull'Intelligenza Artificiale (Microsoft Azure).

Il dispositivo può essere infatti utilizzato per diversi tipi di applicazione attraverso il Software Development Kit (SDK) che rende disponibili le librerie per accedere alle funzionalità della telecamera, alle immagini acquisite ed al modello scheletrico. Nello specifico, l'SDK è diviso in due: uno relativo alla gestione del dispositivo, l'altro relativo alle funzionalità di body tracking. I due SDK sono comunque strettamente correlati, in quanto nel codice per la calibrazione dell'algoritmo di body tracking sono presenti dipendenze alla parte di gestione del dispositivo. Per la realizzazione di software dedicati è necessario integrare queste librerie all'interno di ambienti di sviluppo in linguaggi di programmazione come C++ o C#.

Oltre a ciò, l'SDK fornisce alcuni programmi demo che permettono di utilizzare tutte le funzionalità di base del dispositivo senza alcun bisogno di installare ulteriori pacchetti o di scrivere codice aggiuntivo. È quindi possibile visualizzare immediatamente le immagini catturate dalla telecamera (viewer) ed il modello scheletrico (body tracking viewer) in tempo reale.

Per il body tracking invece, è disponibile uno strumento differente, chiamato "recorder", che non fornisce alcun feedback visuale sui movimenti catturati ma li registra salvando le informazioni di colore e di profondità all'interno di un file MKV (formato Matroska), un contenitore multimediale di tracce video e audio. In seguito, il file può essere analizzato utilizzando un ulteriore programma demo, l'offline\_processor, che stima il modello scheletrico frame per frame e genera un file in forma JSON contenente le informazioni relative a tutti i joints (verranno spiegati in seguito) di ogni singolo modello scheletrico (persona) rilevato dal dispositivo, ovviamente all'interno della scena inquadrata. Questo procedimento risulta però macchinoso e può essere effettuato solo offline e risulta quindi inadatto per un utilizzo più specifico. Per il progetto è stato sviluppato del codice dedicato per accedere al dispositivo ed acquisire le informazioni sul modello scheletrico. I programmi demo sono infatti solo un ausilio per iniziare a prendere confidenza con il dispositivo e capirne le funzionalità offerte.

#### CARATTERISTICHE TECNICHE:

Le camere RGB-Depth utilizzano una tecnologia basata su luce strutturata o su tempo di volo (ToF) per determinare la profondità. Quest'ultima è proprio quella utilizzata dalla Azure Kinect DK.

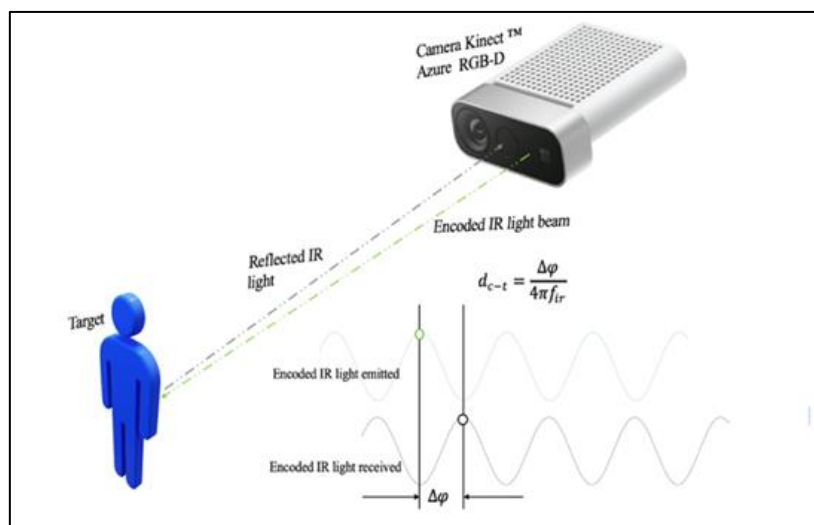


FIGURA 4

Questa tecnologia si basa su un fascio di luce infrarossa generato dalla telecamera con una frequenza specifica che, riflettendosi su un ostacolo presente nel campo visivo (FoV) del dispositivo, ritorna indietro con un valore della fase dell'onda diverso. Calcolando la differenza di fase tra luce emessa e quella riflessa, conoscendo la frequenza di emissione, è possibile ottenere la distanza dell'ostacolo dalla telecamera. Con queste informazioni viene così creata la mappa di profondità, spesso rappresentata in una scala a colori, dove ogni tono rappresenta la distanza dal dispositivo.

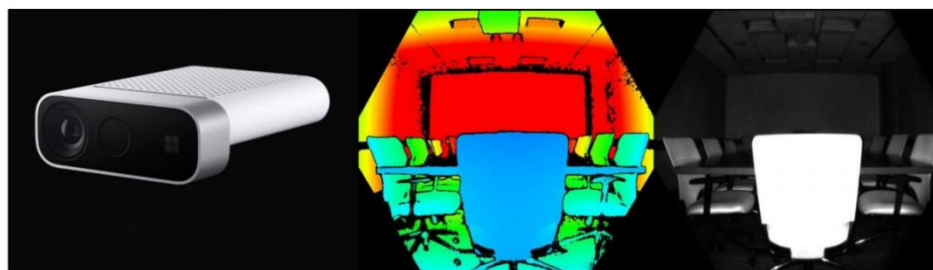


FIGURA 5

A livello di dettagli tecnici, i sensori presenti nel dispositivo sono i seguenti:

- Sensore (fotocamera) di profondità ad 1 MP (megapixel)
- Sensore a colori RGB da 12 MP per un flusso di colori allineato al flusso di profondità
- Accelerometro e giroscopio (IMU) per l'orientamento dei sensori ed il rilevamento spaziale
- Array di 7 microfoni per l'acquisizione di interazioni vocali e audio in campo lontano

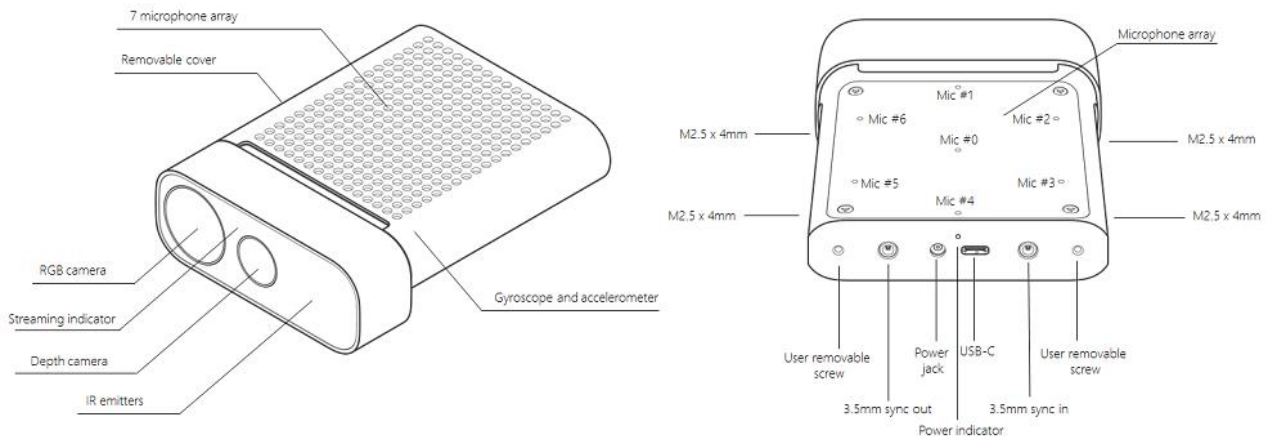


FIGURA 6

	Kinect v1 [17]	Kinect v2 [26]	Azure Kinect
Color camera resolution	1280 × 720 px @ 12 fps 640 × 480 px @ 30 fps	1920 × 1080 px @ 30 fps	3840 × 2160 px @ 30 fps
Depth camera resolution	320 × 240 px @ 30 fps	512 × 424 px @ 30 fps	NFOV unbinned—640 × 576 @ 30 fps NFOV binned—320 × 288 @ 30 fps WFOV unbinned—1024 × 1024 @ 15 fps WFOV binned—512 × 512 @ 30 fps
Depth sensing technology	Structured light—pattern projection	ToF (Time-of-Flight)	ToF (Time-of-Flight)
Field of view (depth image)	57° H, 43° V alt. 58.5° H, 46.6°	70° H, 60° V alt. 70.6° H, 60°	NFOV unbinned—75° × 65° NFOV binned—75° × 65° WFOV unbinned—120° × 120° WFOV binned—120° × 120°
Specified measuring distance	0.4–4 m	0.5–4.5 m	NFOV unbinned—0.5–3.86 m NFOV binned—0.5–5.46 m WFOV unbinned—0.25–2.21 m WFOV binned—0.25–2.88 m
Weight	430 g (without cables and power supply); 750 g (with cables and power supply)	610 g (without cables and power supply); 1390 g (with cables and power supply)	440 g (without cables); 520 g (with cables, power supply is not necessary)

FIGURA 7

A seconda della modalità di funzionamento impostata, la Kinect Azure DK è in grado di stimare la distanza da un minimo di 25 cm fino ad un massimo di 5.5 m; nello sviluppo di una applicazione, è necessario tenere in considerazione queste caratteristiche operative.

### Algoritmo di body tracking

Microsoft ha introdotto il dispositivo Azure Kinect DK nel 2019, progettato come sensore RGB-Depth di nuova generazione e utilizzabile indipendentemente dalle console di gioco. L'Azure Kinect DK offre un Software Development Kit (SDK) che consente l'accesso alle funzionalità della telecamera e del body tracking, con la possibilità di creare software personalizzati in ambienti di sviluppo come C++ o C#. In figura la pipeline per la stima del modello scheletrico.

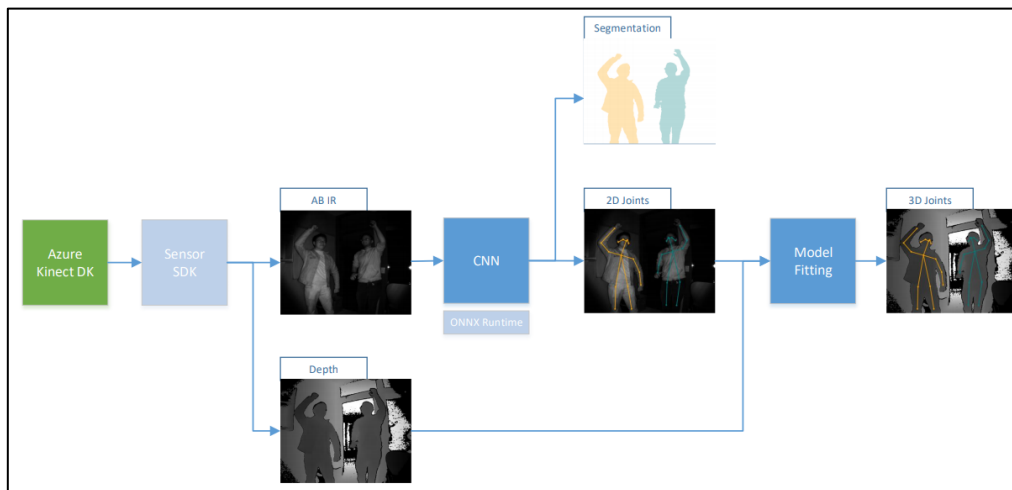


FIGURA 8

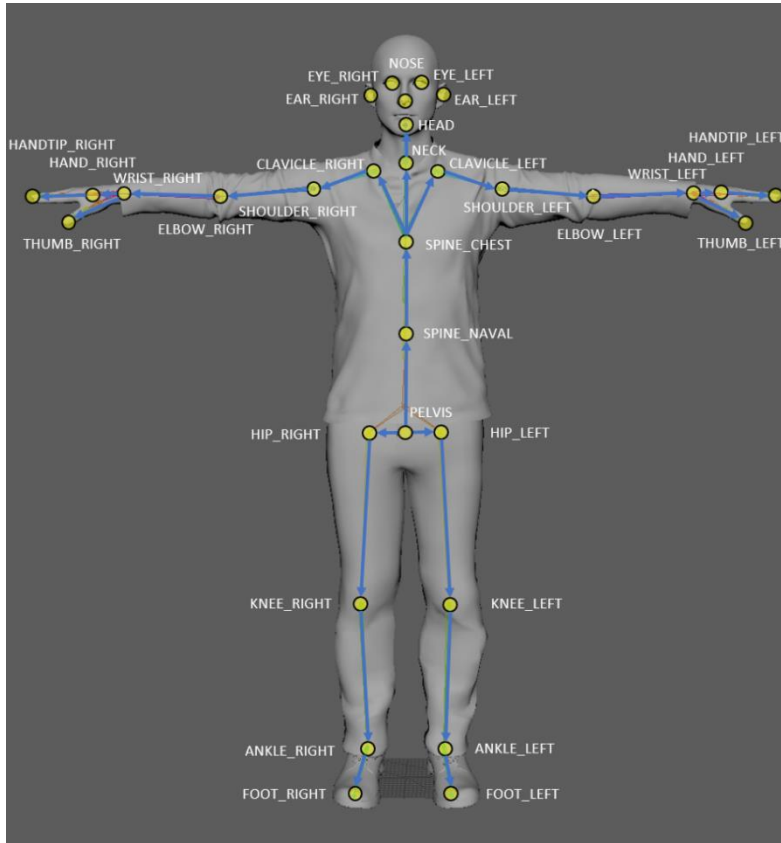
Seguendo lo schema si nota come le immagini ad infrarossi vengano mandate in input alla CNN per effettuare la segmentazione dei corpi rilevati nella scena ed identificare la posizione dei joints 2D. Successivamente le immagini di profondità vengono unite alle posizioni dei joints 2D per ottenere i joints 3D per creare il modello scheletrico. Tutto ciò richiede risorse computazionali maggiori rispetto al modello precedente, soprattutto per ottenere dati in tempo reale. Ciò comporta una maggiore limitazione nell'uso di questo dispositivo, in quanto è necessario che venga utilizzato in combinazione con computer molto performanti, in particolare con schede grafiche molto potenti.

I requisiti minimi per supportare la Azure Kinect, utilizzando il Body Tracking, sono i seguenti:

- Seventh Gen Intel® Core™ i5 Processor (Quad Core 2.4 GHz or faster)
- 4 GB Memory
- NVIDIA GEFORCE GTX 1050 or equivalent
- Dedicated USB3 port

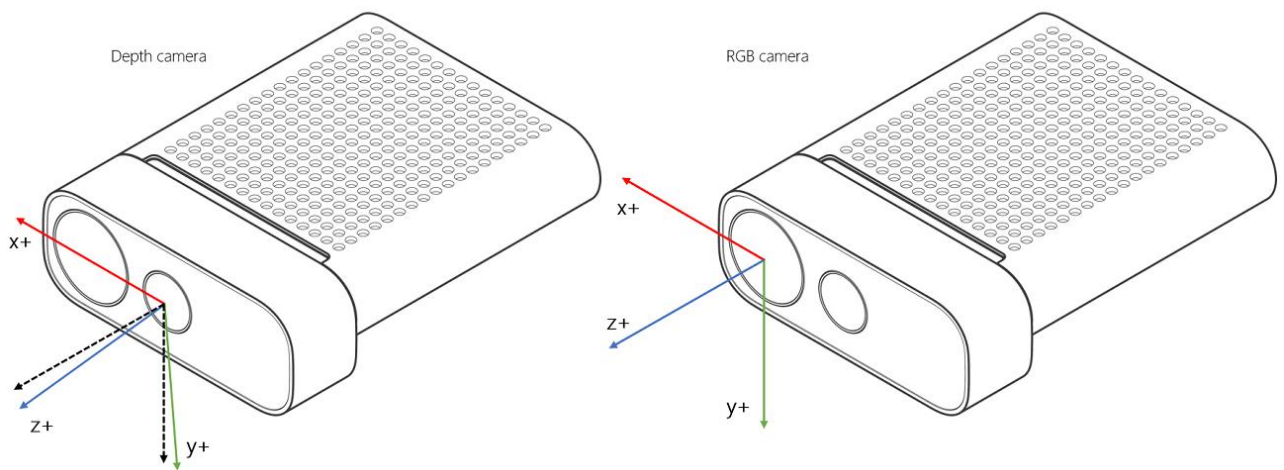
### Il modello scheletrico

Il rilevamento del corpo nella Kinect Azure consente di tenere traccia di più scheletri nello stesso tempo, fino ad un massimo di 6. Ogni corpo è identificato con un proprio ID per la correlazione temporale tra i frame ed il modello scheletrico (Skeleton). Una Skeleton è composta da 32 joints corrispondenti approssimativamente a punti anatomici del corpo. Essi sono organizzati in una gerarchia congiunta che parte dal centro del corpo alle estremità. I vari joint sono collegati tra loro attraverso un Bone (osso) che connette il joint padre al joint figlio. Oltre a ciò, è presente un joint primario, quello pelvico, che non ha padre e da cui parte la gerarchia. Nella figura vengono evidenziati i vari joints e le connessioni (Bone) rispetto al corpo umano.



**FIGURA 9**

Nello specifico, i joints sono punti 3D nello spazio reale e sono rappresentati da una terna di valori  $[x,y,z]$  per indicare la posizione del punto, espressa in millimetri o metri, rispetto all'origine  $[0,0,0]$  del sistema di riferimento, posizionata nel punto focale della camera. Il sistema è orientato in modo che l'asse positivo X punti a destra, l'asse positivo Y punti in basso e l'asse positivo Z punti avanti, rispetto al punto di vista della camera. L'immagine illustra questo concetto.



**FIGURA 10**

Oltre al modello scheletrico il dispositivo fornisce anche una mappa dell'indice del corpo che rappresenta la segmentazione per ogni copro catturato dalla camera di profondità, come mostrato nell'immagine sottostante.



**FIGURA 11**

### Validazione algoritmo di body tracking con sistemi marker-based

Al fine di utilizzare il dispositivo ottico e l'algoritmo di body tracking per tracciamento e analisi del movimento, è stato necessario effettuare una procedura di validazione che permettesse di verificarne l'accuratezza e la robustezza rispetto al sistema di riferimento, cioè i sistemi marker-based. Tale procedura è fondamentale ed è stata eseguita anche in altri studi in cui sono state utilizzate camere RGB-Depth [33]. Dunque, anche nel Progetto ReHome è stata effettuata.

A questo proposito sono stati utilizzati due sistemi optoelettronici di riferimento. Il primo è il sistema BTS SMART DX400© (BTS Bioengineering, Milano, Italia) disponibile presso il Dipartimento di Elettronica, Informatica e Bioingegneria del Politecnico di Milano; esso è composto da 8 camere fisse e sincronizzate che lavorano ad una frequenza di 100 Hz. Il secondo è invece il sistema Optitrack dotato di 6 telecamere, acquistato e installato presso il laboratorio di Engineering for Health and Wellbeing (EHW) dell'IEIT proprio nell'ambito del progetto ReHome. Le caratteristiche tecniche sono espone nella tabella successiva.

	<b>BTS SMART DX-400</b>	<b>OPTITRACK (PRIMEX 13)</b>
<i>Risoluzione del sensore</i>	1 MP	1280 X 1024
<i>Numero camere</i>	Fino a 16	Fino a 16
<i>Accuratezza</i>	< 0.3 mm (4m x 3m x 3m)	+/- 0.2 mm (9m x 9m)
<i>Frame Rate</i>	100 – 300 fps	Fino a 240 fps

**TABELLA 1**

Per procedere con la validazione è stato necessario collocare l'attrezzatura secondo una ben definita disposizione sperimentale, in modo da consentire l'acquisizione simultanea dei movimenti corporei da parte dei due sistemi a confronto, cioè il sistema optoelettronico e la Kinect Azure DK. Quest'ultima è stata posizionata frontalmente al soggetto che esegue i movimenti scelti, mentre il sistema optoelettronico, che per catturare il movimento deve avere una visibilità a 360° di tutti i marcatori, è stato posizionato in modo tale da soddisfare questo aspetto.





FIGURA 12

Come già spiegato in precedenza, il sistema optoelettronico necessita di posizionare i marker riflettenti sul corpo del soggetto e per fare ciò si possono seguire differenti protocolli standard di markerizzazione. Si possono utilizzare sia protocolli anatomici, cioè con il posizionamento dei marker sulla cute in determinati punti di repere, come per esempio il protocollo Davis [34], sia protocolli tecnici in cui un cluster di minimo 3 marker viene applicato in posizione non corrispondenti a punti anatomici, come per esempio il protocollo CAST – Calibrated Anatomical System Technique [35]. Un'altra opzione disponibile è quella di utilizzare un approccio misto combinando le due tipologie, in modo tale da garantire una maggior robustezza di acquisizione ed integrare marker anatomici e tecnici. Quest'ultima è stata proprio la direzione intrapresa per la definizione di una procedura di validazione. In figura viene mostrata la markerizzazione effettuata.

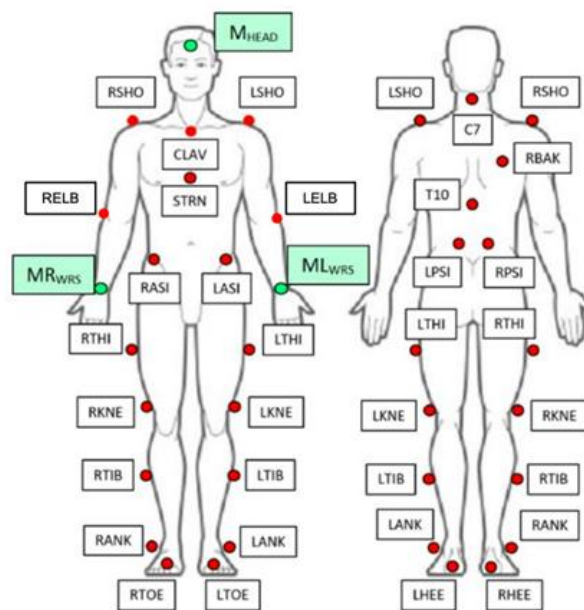


FIGURA 13



Successivamente è stata effettuata la calibrazione tra i due sistemi, in quanto dispongono di sistemi di riferimento propri e diverse frequenze di lavoro: la Kinect Azure DK a 30 fps, il sistema optoelettronico a 100 fps. È perciò necessario calcolare la matrice di roto-traslazione che identifica la geometria tra i due sistemi, così da poter portare i joints di un sistema di riferimento nell'altro e viceversa (allineamento spaziale). Inoltre, occorre eseguire un allineamento delle basi tempo, diverse per i due sistemi, e una operazione di ri-campionamento dei segnali (allineamento temporale) in modo tale che i movimenti catturati dai due sistemi siano confrontabili sia spazialmente che temporalmente.

Terminate queste fasi iniziali, è stato possibile procedere alla validazione vera e propria in cui si confrontano le traiettorie 3D acquisite dai due sistemi simultaneamente. In questo modo è possibile valutare l'accuratezza e la robustezza dell'algoritmo di body tracking durante l'esecuzione di specifici movimenti rappresentativi degli esercizi motori che verranno proposti dalla piattaforma motoria del progetto ReHome e quindi anche dei movimenti richiesti dagli exergames riabilitativi.

Tra i movimenti considerati nella procedura di validazione sono stati inseriti:

- Esercizio statico in posizione eretta di durata 30 secondi, che consiste nel mantenere la posizione statica in piedi per 30 secondi. Utile per confrontare le misure angolari e la stabilità dei giunti del modello scheletrico di Kinect Azure DK.
- Esercizio dinamico in posizione eretta di durata 30 secondi, che consiste nell'eseguire una sequenza di semplici movimenti come flessione delle braccia e uno squat. Serve per confrontare le misure angolari degli arti superiori e inferiori.
- Esercizio statico in posizione seduta di durata 30 secondi, analogo a quello in posizione eretta, ma utile per valutare come la presenza di una sedia o la posizione seduta possano influire sul tracciamento dei giunti.
- Esercizio dinamico in posizione seduta di durata 30 secondi, anche questo simile all'analogo in posizione eretta, serve per valutare l'influenza della presenza di una sedia e della posizione seduta sull'acquisizione.
- Esercizio dinamico arti superiori e inferiori, consistente in movimenti rapidi degli arti superiori e inferiori eseguendo una sequenza di 10 flessioni per ogni braccio e 10 squat. In questo caso l'obiettivo è valutare il comportamento della Kinect in condizioni di alta dinamica con movimenti a velocità crescente.

La procedura di validazione garantisce l'accuratezza nella cattura del movimento per l'algoritmo di body tracking offerto dal Kinect Azure DK, che è alla base del progetto.

## Progettazione exergames

In questo capitolo verranno espone le caratteristiche dei tre exergame riabilitativi progettati e sviluppati all'interno del progetto di tesi. Come in parte accennato in precedenza, gli exergames sono videogiochi sviluppati con lo scopo di eseguire esercizi motori e che, in questo caso specifico, possiedono finalità terapeutiche oltre che ludiche. Il loro obiettivo è di supportare i pazienti affetti da malattia di Parkinson e postumi di Ictus nelle attività riabilitative, permettendo loro di effettuarle anche in ambienti domiciliari, oltre che in strutture ambulatoriali o ospedaliere.

All'interno degli exergames sono state inserite caratteristiche tipiche dei videogiochi, tenendo conto di vari aspetti di gamification e cercando di offrire un ambiente ludico in grado di essere coinvolgente e accattivante. In questo modo si cerca di stimolare i pazienti nel proseguire il programma di riabilitazione motoria e nel raggiungere gli obiettivi fissati dai terapeuti. Come anticipato nei precedenti capitoli, gli exergames sono basati sulla stimolazione di distretti corporei ben definiti e specifici, selezionati insieme ai clinici e ai fisioterapisti sulla base delle caratteristiche principali delle disabilità motorie delle due patologie prese in considerazione. In particolare, si è deciso di concentrarsi sulla stimolazione del tronco e degli arti superiori, cercando di portare miglioramenti alla coordinazione e al controllo motorio, con potenziali benefici per quanto riguarda la postura e la mobilità degli arti superiori nello svolgimento delle attività quotidiane. Oltretutto va sottolineato che i movimenti previsti per gli exergames sono stati selezionati per essere facilmente eseguiti in ambienti domiciliari e senza supervisione, garantendo sempre la sicurezza della persona.

Oltre a ciò, gli exergames saranno presenti all'interno di una più ampia piattaforma motoria, la Health Care Platform, progettata all'interno del progetto ReHome e da cui potranno essere avviati. Con questa piattaforma verranno scambiati vari dati utili per monitorare le attività terapeutiche svolte dai pazienti, gestire da remoto il piano terapeutico e ottenere informazioni dettagliate sull'utilizzo degli exergames. Infatti, è previsto che i terapeuti scelgano in precedenza gli esercizi da far svolgere ai pazienti, stilando un piano terapeutico in cui specificare gli exergames da eseguire e a quale difficoltà, sulla base della situazione clinica. Gli exergames produrranno un insieme di parametri di gioco e di parametri cinematici, questi ultimi specifici per ogni gioco, che sintetizzeranno i risultati ottenuti dai pazienti durante l'esecuzione e caratterizzeranno la prestazione motoria eseguita, permettendo di valutare eventuali miglioramenti o peggioramenti delle funzioni motorie nell'arco del tempo.

Nonostante la presenza della piattaforma motoria, i tre exergames sono stati sviluppati anche per essere avviati standalone e sono in grado di funzionare senza ricevere alcun dato in ingresso dalla piattaforma. In questo caso, attraverso i menù iniziali si potranno scegliere i vari livelli di difficoltà ed avviare i giochi autonomamente. In seguito, sarà spiegato nel dettaglio il funzionamento dei vari menù e i passaggi preliminari necessari per l'esecuzione.

Un altro elemento da sottolineare è che gli exergames, così come la piattaforma motoria, sono stati sviluppati per essere utilizzati mediante il dispositivo ottico RGB-Depth Kinect Azure DK, sfruttando la cattura del movimento corporeo. Ciò è stato fatto per offrire uno strumento non invasivo, portatile e facilmente utilizzabile in ambienti non ambulatoriali, ad un costo relativamente contenuto.

## Elementi in comune

### Descrizione exergames

Gli exergames sono stati realizzati con il motore grafico Unity e sviluppati per sistemi operativi Windows. Come detto in precedenza, sono stati pensati per essere all'interno di una piattaforma motoria, ma allo stesso tempo, essendo degli eseguibili, possono essere avviati "stand-alone" senza

la necessità di configurazione iniziale. Tutti e tre i videogiochi sono basati sull'utilizzo della Microsoft Azure Kinect DK, che pertanto deve essere collegata e configurata prima dell'avvio dei giochi.

La definizione degli exergames è avvenuta in accordo con il Dipartimento di Neuroscienze dell'Università di Torino e dell'IRCCS Istituto Auxologico Italiano di Piancavallo, con l'intento di fornire alcuni strumenti riabilitativi che siano coinvolgenti per il paziente e fruibili anche a domicilio, offrendo al tempo stesso una certa evoluzione diagnostica per quanto concerne gli aspetti di analisi e valutazione medico-scientifica.

I tre exergames sono quindi stati progettati e sviluppati basandosi su alcune tecniche riabilitative consolidate e già ampiamente utilizzate a livello ambulatoriale, ricreando però un ambiente di gioco virtuale 3D in cui i movimenti del paziente sono catturati in tempo reale ed utilizzati come segnali di input per l'esecuzione del gioco.

Le zone corporee utilizzate nei movimenti richiesti dagli exergames sono solamente gli arti superiori e il tronco, in quanto uniche aree di lavoro previste e concordate con i clinici. Inoltre, è necessario che il paziente sia in posizione fissa, seduto su una sedia possibilmente senza braccioli, in modo da sfavorire eventuali errori di tracciamento, e posizionato davanti al dispositivo di acquisizione.

Al momento non è quindi previsto che gli exergames possano essere utilizzati in posizione eretta frontalmente alla camera. Ciò potrebbe essere un'opzione da sviluppare in futuro al fine di aumentare ulteriormente le modalità di utilizzo e permettere il tracciamento dell'intero modello scheletrico.

#### Interazione con interfaccia grafica

Il sistema principale per interagire con l'interfaccia grafica è il tracciamento corporeo (Body Tracking). All'interno dei menù di gioco è presente un cursore, identificato dall'icona di una mano, la cui posizione viene calcolata mappando quella del polso dell'arto selezionato per la navigazione nei menù e facendo una media mobile a quattro periodi delle ultime posizioni tracciate. L'utilizzo della media mobile è stato necessario per assicurare più stabilità alla posizione della mano virtuale su schermo, considerando in particolare il tremore da fermo, sintomo comune tra pazienti affetti da malattia di Parkinson. In questo modo si evitano le false selezioni e si rende il movimento più fluido, seppur sia presente un minimo ritardo tra movimento della mano del paziente e quello della mano virtuale. Inoltre, la scelta di utilizzare il joint del polso per muovere la mano virtuale è motivata da una maggiore affidabilità e stabilità rispetto a quelli della mano.

Per quanto riguarda la selezione nei menù, essa avviene mantenendo la mano virtuale sopra un elemento della GUI per un intervallo di tempo di alcuni secondi. Inoltre, ogni qualvolta la mano virtuale viene posta sopra un elemento interattivo della GUI, si vedrà apparire una barra di caricamento al suo posto, che indicherà il tempo residuo per la selezione. Oltre a ciò, è da sottolineare la presenza di feedback sonori che vengono attivati quando il cursore si posiziona sopra un elemento interattivo e quando viene effettuata una selezione di qualsiasi tipo.

Oltre alle interazioni attraverso il tracciamento del corpo, è possibile navigare nei menù anche utilizzando il classico puntatore del mouse, che normalmente è disattivato, ma in caso di movimento del dispositivo apparirà a schermo e sarà utilizzabile per interagire con l'interfaccia grafica. In seguito, nel caso non venga più spostato, il puntatore verrà nuovamente nascosto.

## Fase preliminare

Per tutti gli exergames è prevista una fase preliminare rivolta al corretto posizionamento della Kinect e del paziente rispetto alla camera, in modo da ottenere un tracciamento del corpo più preciso ed efficace possibile.

Di particolare importanza è il posizionamento del dispositivo e la scelta dell'ambiente di lavoro. In seguito a vari test, è stato previsto che per ottenere un tracciamento migliore, in relazione ai movimenti richiesti dagli exergames, la camera sia posizionata ad altezza ginocchia e rivolta verso il paziente. Al fine di soddisfare questa richiesta è dunque consigliato l'uso di un cavalletto per poter regolare l'altezza e l'inclinazione della Kinect. Soprattutto quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza in quanto la camera deve essere posizionata in modo tale da riprendere il paziente dal basso verso l'alto. Questa scelta è motivata dalle caratteristiche dei movimenti che vengono richiesti negli exergames, in particolare per il gioco "Sci di Fondo". Tracciando il paziente dal basso si ottiene un miglioramento nell'affidabilità e nella precisione del tracciamento e di conseguenza anche la giocabilità ne viene beneficiata.

A questo proposito la prima schermata che si presenta all'avvio è dedicata al posizionamento corretto della camera nell'ambiente di lavoro. In caso di posizione non corretta, cioè nei casi in cui la Kinect abbia un'angolazione errata rispetto al terreno oppure sia inclinata lateralmente, apparirà un messaggio di avviso per segnalare l'errore di posizionamento. Al contrario, se la posizione risulta corretta verrà visualizzata una barra di caricamento che una volta riempita porterà alla schermata successiva.

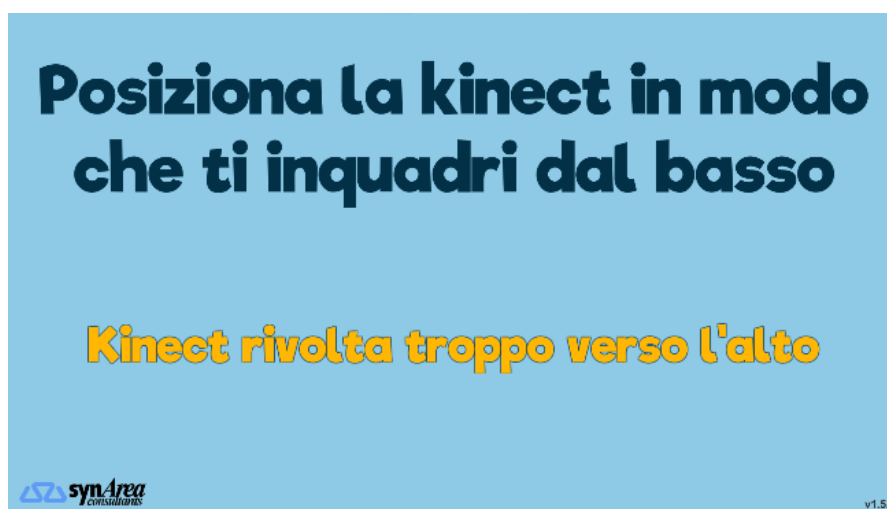


FIGURA 14 – ESEMPIO EXERGAME AEREO

Dopo aver posizionato correttamente il dispositivo, si passa al controllo della posizione del paziente rispetto alla Kinect. La schermata corrente avviserà l'utente sulla posizione corretta da assumere e da mantenere durante il gioco. In particolare, è richiesto che l'utente sia posizionato ad una distanza che va da 1,1 ad 1,7 metri dalla camera e frontalmente ad essa, con un margine laterale di 10 cm rispetto all'asse immaginario dall'asse frontale immaginario passante per il centro della camera. Nei casi in cui non venga riconosciuto alcun modello scheletrico o la persona tracciata non sia in posizione corretta, apparirà anche in questo caso un messaggio di avviso con indicato il tipo di errore riscontrato. Se invece vengono soddisfatti tutti i requisiti richiesti apparirà, come nel caso precedente, una barra di

completamento per indicare l'esito positivo dell'operazione ed avviare il caricamento della schermata successiva.



FIGURA 15 - ESEMPIO EXERGAME SCI

In seguito alla verifica della posizione del dispositivo e del paziente, viene mostrata la penultima schermata della fase preliminare, in cui verrà scelta la mano da utilizzare per la navigazione nei menù di gioco. Sarà sufficiente alzare la mano desiderata per avviarne il caricamento e far apparire sullo schermo l'icona di una mano virtuale per segnalare l'avvenuto riconoscimento. Mantenendo alzato il braccio, l'icona si riempirà gradualmente fino al completamento, momento che indicherà l'avvenuta selezione.

Questo passaggio può risultare non necessario nel caso in cui il gioco sia avviato tramite la piattaforma motoria e l'informazione sulla mano da far utilizzare al paziente sia già stata ricevuta. Il dato viene recuperato dal piano terapeutico che il medico stila per il singolo paziente e nel caso sia presente, la schermata corrispondente alla scelta della mano viene saltata per passare subito a quella successiva.



FIGURA 16 - ESEMPIO EXERGAME TASTIERA

L'ultima schermata di questa fase preliminare corrisponde alle istruzioni per la selezione degli elementi dell'interfaccia di gioco attraverso l'uso del cursore-mano. Per poter cliccare i pulsanti della GUI e navigare nei menù senza l'ausilio del mouse è fondamentale per l'utente saper utilizzare il

cursore legato alla posizione del polso della mano scelta per la navigazione dei menù. La selezione di un elemento dell'interfaccia avviene spostando il cursore-mano sopra di esso e mantenendolo in questa posizione per due secondi. Una barra di caricamento indicherà il completamento di questa operazione e al termine dei due secondi si avvierà l'evento di click per l'elemento selezionato.

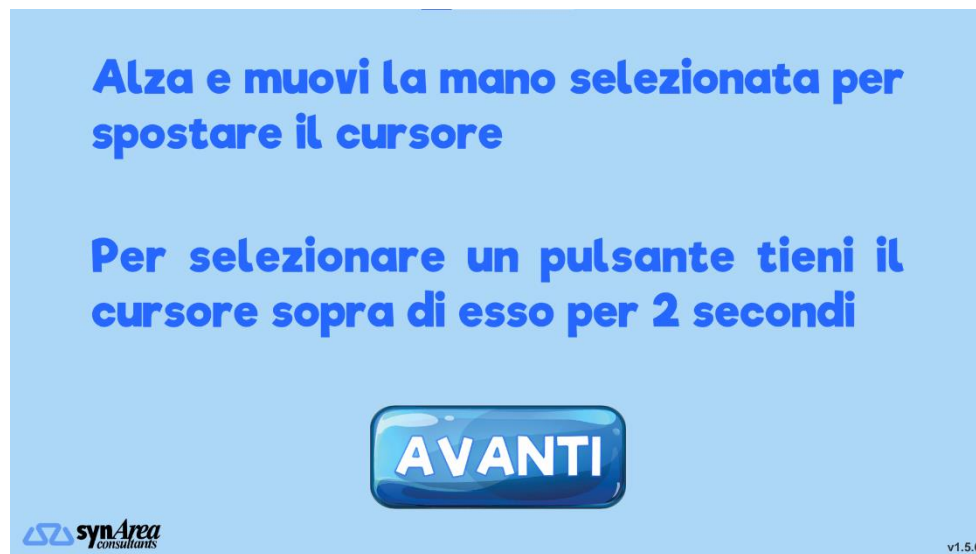


FIGURA 17 - ESEMPIO EXERGAME SCI

Al termine di questi passaggi preliminari sarà possibile accedere al menù di selezione del livello e/o di avvio del gioco.

### Exergame Sci di Fondo

Dopo la fase preliminare verrà visualizzata la schermata dedicata alla selezione del livello di difficoltà della sessione di gioco. Questa schermata può essere saltata nel caso in cui l'informazione sul livello venga ottenuta in input dalla piattaforma motoria. Anche in questo caso l'informazione viene ottenuta dal piano terapeutico stilato dal medico e letta dall'applicazione tramite un file di configurazione presente nella directory principale.

Entrando nel dettaglio di questo exergame, i livelli disponibili sono quattro e corrispondono a tipologie di pista con difficoltà crescente in funzione della loro geometria:

- Circuito rettilineo (livello facile)
- Circuito con una sola curva a destra (livello medio-basso)
- Circuito ad S con una curva a sinistra ed una a destra (livello medio)
- Circuito chiuso ad anello con varie curve (livello difficile)



FIGURA 18 - MENU SCI DI FONDO

In aggiunta ai livelli di difficoltà, l'exergame offre anche tre diverse opzioni di velocità selezionabili: Bassa, Media e Alta. Ciascun livello di velocità determina la massima velocità raggiungibile dall'avatar durante l'esercizio. Questa scelta aggiunge un ulteriore strato di complessità al gioco, che, unito ai vari livelli di difficoltà, offre una gamma più ampia di possibilità per la personalizzazione dell'esperienza di gioco. La velocità predefinita è impostata sul livello basso e per modificarla è sufficiente cliccare sul pulsante "Seleziona velocità" del menù principale per aprire la finestra di selezione.



FIGURA 19 - SELEZIONE VELOCITÀ SCI DI FONDO

Per la selezione del livello di difficoltà invece è sufficiente spostare il cursore sopra il bottone corrispondente e mantenendolo in quella posizione fino alla selezione, come spiegato in precedenza nelle istruzioni relative. Al completamento del caricamento, il livello è selezionato e si passerà alla schermata successiva in cui si potrà dare avvio al gioco oppure tornare indietro alla selezione del livello, sempre cliccando i bottoni opportuni.



FIGURA 20

Prima dell'avvio effettivo della sessione di gioco è però presente un video-tutorial dove vengono mostrati i movimenti da effettuare per l'esecuzione del gioco. Per proseguire sarà poi sufficiente selezionare il tasto "AVANTI" ed avviare il gioco.



FIGURA 21

All'inizio della partita c'è una breve fase di calibrazione in cui si chiede al paziente di distendere le braccia in avanti prima della partenza. Questo passaggio è molto importante per misurare la massima estensione ottenibile degli arti superiori dal paziente, fondamentale per calcolare le soglie entro cui attivare i movimenti dell'avatar di gioco. Infatti, è previsto che per far avanzare l'avatar sulla pista, il paziente debba eseguire un'estensione del braccio pari al 60% di quella massima misurata in precedenza. Al contrario, per rilevare l'arretramento del braccio si tiene conto la soglia del 50% dell'estensione massima, quindi il paziente dovrà far tornare il braccio verso il petto piegandolo di almeno la metà rispetto all'estensione misurata durante la fase di calibrazione.

Per questa fase apparirà una scritta sullo schermo che indicherà all'utente l'azione da eseguire. Mantenuta questa posizione per due secondi, verranno salvate le misure e si chiederà al paziente di



tornare in posizione di partenza, con entrambe le mani vicino al petto. In seguito, partirà un conto alla rovescia e allo scadere inizierà la gara.

## Gara

La fase di gara è l'essenza del gioco e consiste nel percorrere il circuito selezionato nel più breve tempo possibile. Oltre a ciò, è importante raccogliere le gemme gialle presenti nel percorso cercando di non andare contro le staccionate ai bordi della pista per non ottenere malus. Dal punto di vista dei movimenti da effettuare, come già accennato in precedenza, sarà necessario estendere e ritrarre le braccia in maniera alternata in direzione frontale e ad altezza spalle per far avanzare l'avatar lungo la pista. Per cambiare direzione è invece necessario muovere le braccia lateralmente in base alla direzione che si vuole far prendere all'avatar, mantenendo sempre il movimento alternato.



FIGURA 22

Raggiunto il traguardo del circuito, la gara finisce e viene così visualizzato a schermo una finestra con le informazioni sul tempo impiegato per percorrere la pista e i punti raccolti, oltre agli errori commessi, corrispondenti al numero di volte in cui si è andati contro le staccionate laterali. Da qui sarà poi possibile tornare al menu principale.



FIGURA 23

### Modelli 3D utilizzati

Tutti gli exergames del progetto, compreso lo Sci di Fondo, sono stati progettati per avere uno stile low poly ed i modelli utilizzati vanno in questa direzione. La scelta è motivata dalla necessità di non sovraccaricare ulteriormente l'hardware utilizzato poiché la Kinect richiede una grande quantità di risorse computazionali.

Il paesaggio di ogni pista è stato assemblato utilizzando vari modelli scaricati dall'Asset Store di Unity, tra cui gli alberi, i blocchi di ghiaccio e le varie rocce presenti. Alcuni di questi elementi sono stati successivamente ritoccati per adattarli alle esigenze di gioco, come per esempio il modello 3D del terreno, che è stato modificato utilizzando Blender, un software di modellazione 3D, in modo tale da adeguarlo per la sistemazione delle varie piste.

Oltre a questi modelli, anche il pupazzo di neve è stato scaricato dall'Asset Store di Unity; è caratterizzato da maggiori dettagli grafici rispetto agli altri elementi ed inoltre possiede uno skeleton, fondamentale per permettere l'utilizzo delle animazioni sul personaggio e simularne il movimento, che nel nostro caso dipende dai dati di tracciamento ottenuti dalla Kinect.

Infine sono stati modellati direttamente altri elementi grafici, anche in questo caso utilizzando Blender. In particolare, sono stati realizzati i modelli delle quattro piste da sci, del traguardo finale e delle staccionate. Le gemme sono state invece generate utilizzando i modelli 3D di base presenti direttamente su Unity.

Per quanto riguarda le texture utilizzate per i modelli creati autonomamente sono state ottenute dal sito [www.textures.com](http://www.textures.com).

### Exergame Tastiera

Anche per questo exergame, dopo la fase preliminare di posizionamento della camera e del paziente rispetto ad essa, unita alla selezione della mano da utilizzare per la navigazione nei menù di gioco e alle istruzioni per la selezione dei pulsanti della GUI, è presente una schermata iniziale in cui si potrà scegliere il livello di difficoltà. Qualora l'informazione riguardo al livello di difficoltà della sessione sia ricevuta dalla piattaforma motoria, si passerà direttamente alla schermata successiva per l'avvio del gioco.

I livelli di difficoltà disponibili sono tre e differiscono per la lunghezza della serie di tasti che dovranno essere premuti correttamente durante il gioco:

- Serie con 5 tasti (facile)
- Serie con 7 tasti (medio)
- Serie con 10 tasti (difficile)



FIGURA 24

Per la selezione del livello è sufficiente spostare il puntatore sopra il bottone corrispondente come già spiegato in precedenza. Al completamento del caricamento, il livello è selezionato e si passerà alla schermata successiva in cui si potrà dare avvio al gioco oppure tornare indietro alla selezione del livello, sempre cliccando i bottoni opportuni.

Prima dell'avvio effettivo della sessione di gioco è però presente un video-tutorial dove vengono mostrati i movimenti da effettuare per l'esecuzione del gioco. Per proseguire sarà poi sufficiente selezionare il tasto "AVANTI" ed avviare il gioco.



FIGURA 25 - SELEZIONE MANO DI GIOCO

Prima di iniziare, in caso non sia stato già letta l'informazione dal file di configurazione, si dovrà scegliere la mano da utilizzare in gioco e apparirà quindi una schermata per effettuare questa selezione. La scelta di non utilizzare automaticamente la mano scelta per la navigazione nei menù è dovuta dal fatto che per molti pazienti è utile poter usare la mano preferita per i menù ed invece allenare attraverso le sessioni di gioco quella critica.



FIGURA 26

L'exergame in questione prevede che venga utilizzato un solo braccio alla volta, coincidente a quello della mano scelta in precedenza per la navigazione nei menù di gioco.

All'inizio della partita è presente una fase di calibrazione dove viene chiesto al paziente di estendere in avanti il braccio che verrà utilizzato, al fine di impostare al meglio la posizione della mano virtuale nel gioco e garantire una corrispondenza ottimale tra la posizione della mano del paziente e quella virtuale. In questo esercizio è infatti importante che i movimenti effettuati nella realtà combacino con quelli visualizzati nel gioco per poter ottenere un effetto immersivo e non creare stress nell'esecuzione. In particolare, la posizione della mano virtuale viene calcolata in base all'angolazione del braccio utilizzato rispetto al corpo del paziente. Il movimento avanti-indietro della mano virtuale è invece gestito misurando la percentuale di estensione del braccio rispetto all'estensione massima calcolata in fase di calibrazione iniziale.

Dopo questa fase inizia l'esecuzione del gioco, che consiste nel premere i tasti della tastiera nella sequenza proposta. Il tasto da premere in quel momento viene segnalato accendendolo e la sequenza proposta è di durata corrispondente al livello di difficoltà selezionato ed ha un ordine di tasti sempre casuale. Per cliccare un tasto sarà sufficiente portare la mano virtuale a collidere con esso, in questo modo nel caso il tasto premuto sia quello corretto verrà riprodotta la nota corrispondente ed il tasto verrà spento, così che venga poi acceso quello successivo. Nel caso venga premuto un tasto sbagliato viene invece riprodotto un suono d'errore e si avranno a disposizione tentativi infiniti per arrivare a cliccare il tasto giusto.



FIGURA 27

Una volta che sarà completata la sequenza proposta vengono presentati i risultati ottenuti, quali il tempo di esecuzione e gli errori commessi. A questo punto si potrà tornare alla schermata iniziale per un'altra sessione di gioco.



FIGURA 28

#### Modelli 3D utilizzati

Anche per questo exergames sono stati utilizzati dei modelli low poly, in quanto lo stile ricercato nei tre giochi coincide, così come le motivazioni di questa scelta.

Entrando più nel dettaglio, l'unico modello ottenuto dall'Asset Store è quello della mano virtuale a cui però è stato modificato il colore al fine di renderlo più in stile "cartoon". Per aumentare l'effetto di immersione, la mano viene rappresentata graficamente destra o sinistra in accordo alla selezione della mano da utilizzare durante la fase iniziale.

Il modello della tastiera è stato invece assemblata utilizzando gli oggetti 3D offerti da Unity e il movimento dei tasti è simulato mediante delle animazioni che ne simulano la pressione.

## Exergame Aereo

Per quanto riguarda l'exergame dell'aereo, anche questo ripropone lo stesso schema dei due precedenti exergames. Dopo la fase preliminare si arriva al menu principale di scelta del livello di difficoltà, che anche in questo caso può essere saltato nel caso in cui l'informazione sul livello venga ricevuto dalla piattaforma motoria. I livelli di difficoltà disponibili sono tre e corrispondono a diverse tipologie di "corridoi aerei" da percorrere con difficoltà crescente.

I vari livelli si differenziano per la diversa disposizione degli ostacoli e dei cerchi da attraversare nell'ambiente di gioco. In particolare, nel livello difficile sono presenti anche dei cerchi rossi da evitare ed inoltre, dal livello medio in poi, è presente anche una parte iniziale di decollo. I tre livelli sono così definiti:

- Corridoio aereo facile, senza fase di decollo e anelli blu posizionati in modo tale da essere facilmente attraversati
- Corridoio aereo medio, con fase di decollo e anelli blu in posizioni leggermente più ostiche e presenza di cerchi rossi da evitare
- Corridoio aereo difficile, con fase di decollo, anelli blu da attraversare in posizioni più ostiche e presenza di cerchi rossi da evitare



FIGURA 29 - SELEZIONE VELOCITÀ AEREO

In aggiunta ai livelli di difficoltà, l'exergame offre anche tre diverse opzioni di velocità selezionabili: Bassa, Media e Alta. Ciascun livello di velocità determina la massima velocità raggiungibile dall'avatar durante l'esercizio. Questa scelta aggiunge un ulteriore strato di complessità al gioco, che, unito ai vari livelli di difficoltà, offre una gamma più ampia di possibilità per la personalizzazione dell'esperienza di gioco. La velocità predefinita è impostata sul livello basso e per modificarla è sufficiente cliccare sul pulsante "Seleziona velocità" del menù principale per aprire la finestra di selezione.





FIGURA 30 – MENÙ DI GIOCO AEREO

Anche in questo caso per selezionare il livello sarà sufficiente posizionare il puntatore sul tasto corrispondente e si avvierà il caricamento per effettuare la selezione. In seguito, superata la solita schermata per l'avvio del gioco o per tornare alla selezione dei livelli, si presenta il video-tutorial utile per spiegare i movimenti da effettuare durante la partita. Per proseguire sarà poi sufficiente selezionare il tasto "AVANTI" ed avviare il gioco.



FIGURA 31

All'avvio della partita, al contrario di quanto succede per gli altri exergame, non è presente alcuna fase di calibrazione, in quanto non sono necessarie misurazioni particolari per l'esecuzione del gioco. Sarà sufficiente aprire le braccia lateralmente, simulando le ali di un aereo, per far partire il conto alla rovescia e iniziare a comandare l'aereo.



FIGURA 32

L'assenza di una fase di calibrazione è dovuta al fatto che per gestire l'aereo non sono necessari dei riferimenti particolari da ottenere misurando caratteristiche dell'utente. L'aereo viene infatti governato semplicemente in base alle posizioni dei polsi delle mani e, nel caso del decollo, dall'angolazione del tronco dell'utente rispetto all'asse immaginario perpendicolare al terreno. In particolare, per quanto riguarda il controllo del rollio, viene misurato l'angolo creato dalla retta passante per i polsi con l'asse immaginario parallelo al terreno. Quindi per far virare l'aereo sarà necessario cambiare l'angolazione delle braccia e del corpo

Successivamente si passa all'esecuzione del gioco, il cui scopo è quello di percorrere il "corridoio aereo" disponibile fino alla fine, cercando di attraversare più cerchi blu possibili per guadagnare punti e di non centrare gli ostacoli presenti, oltre ad evitare i bordi dell'ambiente di gioco.



FIGURA 33



Nei livelli successivi al primo sarà inoltre presente la fase di decollo, in cui l'utente ha il compito di alzare in volo l'aereo inclinando all'indietro il proprio busto. Raggiunta la quota predefinita, questo controllo viene disattivato per non rendere troppo difficile la gestione dell'aereo nelle fasi successive. Nei livelli Medio e Difficile inoltre sono stati aggiunti dei cerchi rossi che nel caso vengono attraversati corrispondono a malus che faranno abbassare il punteggio finale.

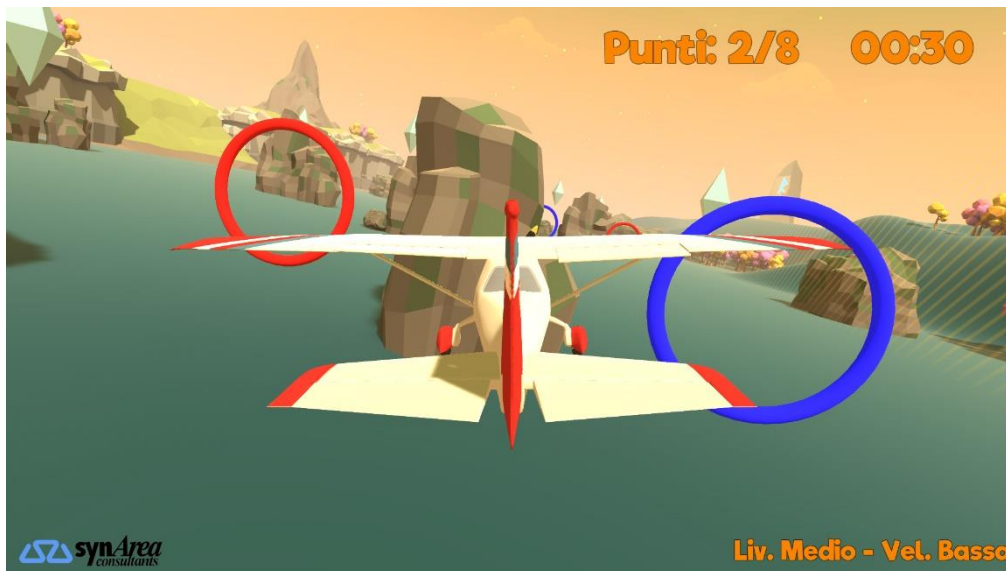


FIGURA 34

Raggiunta la fine dello spazio di volo si concluderà la partita e verranno visualizzati i risultati, comprendenti il tempo impiegato ed il punteggio ottenuto, con eventuali informazioni sui cerchi sbagliati attraversati. Da qui sarà possibile ritornare al menù principale.



FIGURA 35

## Modelli 3D utilizzati

Lo stile del gioco è sempre di tipo low poly, così come gli altri exergame, al fine di ottimizzare al meglio le performance. In particolare, l'ambiente di gioco rimane semplice e minimalista.

I modelli 3D utilizzati includono l'aeroplano, ottenuto tramite l'Asset Store di Unity ed in seguito modificato utilizzando Blender in modo da ottenere la rotazione dell'elica, gli anelli, che sono stati creati con Blender, e gli ostacoli presenti, che sono stati ottenuti con i modelli 3D standard di Unity. Oltre a ciò, ci sono anche le barriere del "corridoio aereo" ed il terreno, anch'essi oggetti standard del motore grafico, a cui però sono applicate delle texture ottenute anche qui tramite [www.textures.com](http://www.textures.com).

## Specifiche dati in ingresso e in uscita

Come già accennato in precedenza, è previsto che gli exergames possano ricevere alcuni dati in ingresso dalla piattaforma motoria. Nessuno di essi è obbligatorio ed anzi, gli exergames possono essere avviati standalone senza la necessità di alcun dato in input. Tuttavia, nell'ambito del progetto ReHome è necessario che vengano scambiati alcuni dati importanti tra exergames e piattaforma, in modo tale che i terapeuti possano monitorare le attività svolte dai pazienti, gestire quali esercizi far eseguire e selezionare le modalità di esecuzione.

Oltre ai dati in ingresso, è necessario che gli exergames producano anche dati in uscita utili per l'analisi e il monitoraggio del lavoro svolto. Al momento alcuni di essi verranno recuperati direttamente dalla piattaforma mentre altri saranno semplicemente salvati in locale per un'eventuale analisi successiva.

Più precisamente, è previsto che, in base al piano terapeutico definito per il paziente, la piattaforma motoria abiliti il tasto per l'avvio del singolo exergame e carichi il file di configurazione, in formato JSON, in una cartella specifica con all'interno tutti i parametri di ingresso utili per l'avvio:

- Mano per l'interazione con i menù di gioco (è preferibile utilizzare la mano sana o comunque con minor compromissione motoria). Nel caso non sia specificata verrà selezionata durante la fase preliminare del gioco nella schermata corrispondente.
- Livello di difficoltà. Viene ottenuto dal piano terapeutico e nel caso in cui non sia specificato verrà selezionato dal paziente nel menù di gioco.
- Path di destinazione dei risultati di gioco. Nel caso in cui non sia specificato verrà impostato un path di default.
- ID paziente. Identificativo numerico del paziente, identifica il paziente in modo univoco in tutte le sessioni di gioco.
- Stato paziente. È una stringa che identifica il livello di disabilità del paziente.
- Velocità di esecuzione. Valore intero da 1 a 3, assente nel exergame "Tastiera".

I dati prodotti dagli exergames invece, di cui alcuni verranno trasferiti alla piattaforma motoria, sono stati divisi in tre tipologie:

- Risultati di gioco
- Dati di tracciamento
- Dati modello scheletrico
- Dati posizioni avatar

Al termine della sessione di gioco verrà effettuato il salvataggio dei risultati e ciò indicherà alla piattaforma motoria il completamento della prova. Questi dati verranno salvati nel path di destinazione che è stato specificato attraverso il file di configurazione oppure in un path di default nel caso la prima opzione non sia perseguibile.

In particolare, i dati di tracciamento ed i dati del modello scheletrico verranno acquisiti e calcolati ogni 30 ms, che corrisponde alla frame rate della Microsoft Azure Kinect. Il modello scheletrico ha una struttura complessa e soprattutto una dimensione notevole se paragonata con gli altri dati; pertanto, è un'informazione che non verrà scambiata con la piattaforma motoria ma sarà solamente salvata in locale. Si tratta di un file JSON in cui sono salvate le posizioni di tutti i joints dello skeleton catturato dal dispositivo ottico ad ogni frame e che può essere utilizzato in una fase successiva per effettuare un'analisi più approfondita. A tal proposito verrà presentata in seguito un'applicazione web sviluppata appositamente per sfruttare questo tipo di dato ed offrire la possibilità di rivedere le attività svolte dai pazienti attraverso un avatar virtuale.

I dati di tracciamento invece corrispondono a misurazioni e calcoli effettuati sulla base delle posizioni dei joints più importanti e significativi per ogni exergames, sulla base dei movimenti richiesti. I parametri in questione saranno infatti differenti per ogni gioco e saranno inseriti anch'essi in un file JSON nel path di destinazione specificato. Tutti i parametri sono stati ovviamente concordati con i terapeuti e rappresentano informazioni essenziali per l'analisi delle prestazioni dei pazienti, in modo da poter monitorare le loro attività e osservare eventuali miglioramenti o peggioramenti della loro condizione motoria.

I dati sulle posizioni dell'avatar rappresentano l'insieme di tutte le posizioni che l'avatar ha assunto durante la sessione di gioco. Vengono registrati ogni 30 ms e includono due set di informazioni: la posizione nel mondo virtuale con le componenti x, y, z e il vettore di rotazione, anch'esso con le componenti x, y, z. Anch'essi sono salvati alla fine di ogni livello in un file JSON nel path di destinazione specificato.

In conclusione, per i tre exergames si presentano in dettaglio i parametri specifici per ognuno di essi.

#### Exergame Sci di Fondo

Risultati di gioco, che vengono inviati alla piattaforma attraverso un file JSON che viene salvato nel path di destinazione:

- Tempo di gioco, tempo impiegato a completare il livello
- Punteggio, numero di gemme raccolte
- Livello selezionato, indicazione sul livello di difficoltà della prova svolta
- Numero di errori commessi, numero di collisioni con i bordi della pista
- Numero di pause effettuate, numero di volte in cui il paziente abbassa le braccia
- Flag completamento, indica se è stato raggiunto il traguardo o il paziente è uscito prima dalla partita

Dati di tracciamento, anch'essi inviati alla piattaforma motoria ma in questo caso sono salvati in un file TXT, caricato sempre nel path di destinazione:

- Massima estensione di ogni braccio misurata in fase preliminare
- Timestamp, per ogni frame acquisito indica il tempo di riferimento (dato temporale)
- Estensione di ogni braccio: per ogni frame, indica l'estensione del braccio (per analisi del movimento alternato)
- Angolo di rotazione di ogni braccio per ogni frame indica la traiettoria del braccio per curvare
- Flag di pausa attiva, per ogni frame indica se il gioco è in pausa

Da notare come in questo caso tutti i dati, tranne quelli sulla massima estensione, sono ripetuti per ogni frame.

Dati modello scheletrico in file JSON, che vengono mantenuti in locale:

- Posizione di tutti i joints dello skeleton per ogni frame, con informazione sul timestamp corrispondente

Notare che anche in questo caso i dati sono ripetuti per ogni frame.

### Exergame Tastiera

Risultati di gioco, che vengono inviati alla piattaforma attraverso un file JSON che viene salvato nel path di destinazione:

- Tempo di gioco, tempo impiegato a completare il livello
- Livello selezionato, indicazione sul livello di difficoltà della prova svolta
- Numero di errori commessi, numero di collisioni con i bordi della pista
- Numero di pause effettuate, numero di volte in cui il paziente abbassa il braccio utilizzato
- Flag completamento, indica se è stata completata la sequenza di tasti da premere

Dati di tracciamento, anch'essi inviati alla piattaforma motoria ma in questo caso sono salvati in un file TXT, caricato sempre nel path di destinazione:

- Mano utilizzata per l'esecuzione del gioco, attualmente coincide con quella utilizzata per i menù
- Massima estensione, del braccio di gioco misurata in fase preliminare
- Timestamp, per ogni frame acquisito indica il tempo di riferimento (dato temporale)
- Estensione del braccio utilizzato: per ogni frame, indica l'estensione del braccio (per analisi del movimento alternato)
- Angolo di rotazione di ogni braccio per ogni frame indica spostamento laterale del braccio
- Flag di pausa attiva, per ogni frame indica se il gioco è in pausa
- Tasto acceso, per ogni frame riporta il numero del tasto attivo (da premere)
- Flag tasto premuto, per ogni frame indica il tasto premuto. Insieme al tasto acceso serve per l'analisi dei ritardi tra attivazione stimolo ed effettiva pressione del tasto e per l'analisi del tempo di permanenza sul tasto

Da notare come in questo caso tutti i dati, tranne quelli sulla mano utilizzata e sulla massima estensione, sono ripetuti per ogni frame.

Dati modello scheletrico in file JSON, che vengono mantenuti in locale:

- Posizione di tutti i joints dello skeleton per ogni frame, con informazione sul timestamp corrispondente

Notare che anche in questo caso i dati sono ripetuti per ogni frame.

### Exergame Aereo

Risultati di gioco, che vengono inviati alla piattaforma attraverso un file JSON che viene salvato nel path di destinazione:

- Tempo di gioco, tempo impiegato a completare il livello
- Punteggio, numero di anelli corretti attraversati
- Livello selezionato, indicazione sul livello di difficoltà della prova svolta
- Numero di errori commessi, numero di anelli sbagliati attraversati (per i livelli in cui è previsto)

- Numero di pause effettuate, numero di volte in cui il paziente abbassa le braccia
- Flag completamento, indica se è completato il percorso

Dati di tracciamento, anch'essi inviati alla piattaforma motoria ma in questo caso sono salvati in un file TXT, caricato sempre nel path di destinazione:

- Timestamp, per ogni frame acquisito indica il tempo di riferimento (dato temporale)
- Angolo apertura di ogni braccio, per ogni frame indica l'angolo tra il braccio (esteso lateralmente) ed il tronco. Utile per l'analisi del movimento
- Angolo di rollio (virata) delle braccia, per ogni frame indica l'angolo delle braccia aperte rispetto al terreno. Utile per l'analisi del movimento
- Angolo di beccheggio del corpo, per ogni frame indica l'inclinazione del tronco in avanti o indietro. Utile per l'analisi del movimento
- Estensione di ogni braccio: per ogni frame, indica l'estensione del braccio (per analisi del movimento alternato)
- Flag fase di decollo, per ogni frame indica quando si è in fase di decollo
- Flag di pausa attiva, per ogni frame indica se il gioco è in pausa

Da notare come in questo caso tutti i dati sono ripetuti per ogni frame.

Dati modello scheletrico in file JSON, che vengono mantenuti in locale:

- Posizione di tutti i joints dello skeleton per ogni frame, con informazione sul timestamp corrispondente

Notare che anche in questo caso i dati sono ripetuti per ogni frame.

## Risultati

In questa sezione verranno riportati i risultati relativi ai test eseguiti da soggetti sani per attestare l'usabilità degli exergames e l'affaticamento che essi possono causare. Questi test sono stati eseguiti presso la sede SynArea di Torino. I soggetti coinvolti non hanno ricevuto alcun suggerimento o informazione prima dell'utilizzo degli exergames e hanno eseguito tutti le prove in autonomia.

Insieme a questi risultati, verranno presentati anche quelli relativi alle sperimentazioni eseguite su soggetti con Parkinson o postumi di Ictus, eseguite in ambito ospedaliero presso la UO di Neurologia e Neuroriabilitazione dell'Ospedale San Giuseppe di Piancavallo, struttura dell'Istituto Auxologico Italiano, e presso UPO, AO Maggiore di Novara.

## Usabilità

L'usabilità degli exergames è stata valutata attraverso l'uso del questionario standard SUS (System Usability Scale), il quale è stato somministrato ai partecipanti delle sessioni di test e ad alcuni dei pazienti coinvolti nelle sperimentazioni ospedaliere. Tuttavia, i risultati ottenuti da questi ultimi devono essere considerati approssimativi, poiché il campione è composto solo da dieci elementi e il questionario è stato somministrato in modo generico, prendendo in considerazione l'insieme degli exergames e non differenziando tra uno e l'altro. Nonostante ciò, l'analisi di questi risultati può essere significativa, in quanto provengono da soggetti per i quali le applicazioni sono state sviluppate.

I risultati relativi ai test condotti su soggetti sani invece sono stati ottenuti dopo una fase di prova di tutti gli exergames. A 32 soggetti sani sono stati somministrati i questionari SUS, ciascuno riferito a un singolo exergame. Questo approccio ha permesso di valutare in modo specifico l'usabilità di ciascun exergame. In questo contesto, i risultati possono essere considerati affidabili, anche se il campione non includeva soggetti specifici per questo tipo di applicazioni, come pazienti affetti da Parkinson o post-Ictus.

Prima della descrizione dettagliata dei risultati ottenuti, verrà descritto come è strutturato e perché viene utilizzato il questionario SUS.

## Questionario SUS

Il questionario SUS, dove SUS è l'abbreviazione di Scala di Usabilità del Sistema (System Usability Scale), è un questionario usato per misurare l'usabilità e la facilità d'uso di un sistema. Esso è composto da 10 domande con 5 opzioni di risposta che rappresentano una scala di valutazione da 1 a 5, nel quale 1 rappresenta la risposta "non d'accordo", mentre 5 rappresenta la risposta "molto d'accordo".

Il questionario è progettato per valutare quattro dimensioni della facilità d'uso di un sistema, ovvero l'efficacia, l'efficienza, l'effetto desiderato, che misura quanto l'utente trova il sistema piacevole e soddisfacente, e la memorabilità, che invece misura quanto l'utente è in grado di ricordare come usare il sistema.

## Risultati soggetti sani

Nelle sessioni di prova condotte con soggetti sani, i questionari SUS sono stati somministrati ai partecipanti solo dopo aver provato tutti gli exergames. Ogni persona è stata invitata a svolgere almeno due prove per ciascun exergames, eseguendo almeno una volta il livello più facile e almeno una volta quello più difficile.

Per quanto riguarda il campione, esso era composto da 32 soggetti sani di età compresa tra i 22 e i 69 anni. Poco più della metà di essi aveva al massimo 26 anni, mentre circa il 23% aveva un'età superiore ai 53 anni. La restante parte del campione si collocava tra i 27 e i 37 anni (circa 23%). Inoltre, il 77% di essi ha dichiarato di essere alla prima esperienza con questo tipo di applicazione, ovvero exergames che sfruttano il tracciamento del corpo.

### Exergame Tastiera

	<b>1 – Non d'accordo</b>	<b>2 – Poco d'accordo</b>	<b>3 – Neutrale</b>	<b>4 – Abbastanza d'accordo</b>	<b>5 – Molto d'accordo</b>
<i>1. Penso che mi piacerebbe utilizzare questo sistema frequentemente</i>	0,00%	5,56%	22,22%	38,89%	33,33%
<i>2. Ho trovato il sistema complesso senza che ce ne fosse bisogno</i>	66,67%	16,67%	11,11%	5,56%	0,00%
<i>3. Ho trovato il sistema molto semplice da usare</i>	0,00%	0,00%	22,22%	38,89%	38,89%
<i>4. Penso che avrei bisogno del supporto di una persona già in grado di utilizzare il sistema</i>	83,33%	0,00%	5,56%	11,11%	0,00%
<i>5. Ho trovato le varie funzionalità del sistema bene integrate</i>	5,56%	0,00%	5,56%	61,11%	27,78%
<i>6. Ho trovato incoerenze tra le varie funzionalità del sistema</i>	77,78%	16,67%	5,56%	0,00%	0,00%
<i>7. Penso che la maggior parte delle persone potrebbero imparare ad utilizzare il sistema facilmente</i>	0,00%	0,00%	5,56%	27,78%	66,67%
<i>8. Ho trovato il sistema molto macchinoso da utilizzare</i>	44,44%	33,33%	11,11%	5,56%	5,56%
<i>9. Ho avuto molta confidenza con il sistema durante l'uso</i>	0,00%	5,56%	27,78%	38,89%	27,78%
<i>10. Ho avuto bisogno di imparare molti processi prima di riuscire ad utilizzare al meglio il sistema</i>	83,33%	11,11%	5,56%	0,00%	0,00%

I risultati dei questionari SUS somministrati sull'exergame Tastiera hanno restituito un punteggio complessivo di 83, un valore ottimo e ben al di sopra della media di 68, che rappresenta il punteggio minimo per considerare un sistema facilmente usabile. Questo risultato riflette non solo la soddisfazione generale degli utenti, ma anche un elevato livello di apprezzamento e facilità d'uso del sistema, sottolineando così il successo nell'ottenere un'esperienza utente positiva e accessibile.

Analizzando i risultati in tabella relativi, emerge che il 72% circa dei partecipanti è d'accordo o molto d'accordo nell'affermare che gli piacerebbe usare gli exergames frequentemente (domanda 1), mentre solamente il 5% circa ha risposto negativamente a questa domanda. Il sistema inoltre non sembra inutilmente complesso per la maggior parte dei soggetti; infatti, solo il 5% circa del campione ha risposto negativamente a questo quesito (domanda 2). Per quanto riguarda la facilità d'uso, nessun partecipante ai test ha trovato difficoltà nell'utilizzo e anzi la maggior parte di loro, circa il 77%, trova l'exergame molto facile da usare (domanda 3). Inoltre, secondo la maggior parte dei partecipanti il sistema risulta che sia utilizzabile anche senza la necessità di aiuto esterno (domanda 4) e che le sue funzionalità siano ben integrate (domanda 5) e coerenti tra loro (domanda 6). La quasi totalità del

campione, circa il 94,45%, reputa che la maggior parte delle persone imparerebbe ad usare il sistema molto velocemente (domanda 7), mentre il 77% non lo ha trovato macchinoso. Da notare però che un piccolo 10% pensa che l'exergame sia abbastanza o molto macchinoso (domanda 8). Nonostante ciò, le risposte riguardo al livello di confidenza percepito durante l'uso del sistema sono per lo più positive, con un 66% di risposte positive o molto positive (domanda 9). Infine, la quasi totalità del campione, circa 94,44%, afferma di non aver dovuto imparare molti processi per poter utilizzare l'exergame (domanda 10).

In conclusione, l'exergame tastiera risulta avere un alto livello di usabilità e facilità d'uso, in cui solamente una piccola parte dei partecipanti ai test ha riscontrato difficoltà nell'utilizzo o percepito qualche comportamento macchinoso del sistema.

#### Exergame Aereo

	<b>1 – Non d'accordo</b>	<b>2 – Poco d'accordo</b>	<b>3 – Neutrale</b>	<b>4 – Abbastanza d'accordo</b>	<b>5 – Molto d'accordo</b>
<i>1. Penso che mi piacerebbe utilizzare questo sistema frequentemente</i>	0,00%	0,00%	0,00%	33,33%	66,67%
<i>2. Ho trovato il sistema complesso senza che ce ne fosse bisogno</i>	77,78%	11,11%	11,11%	0,00%	0,00%
<i>3. Ho trovato il sistema molto semplice da usare</i>	0,00%	5,56%	16,67%	27,78%	50,00%
<i>4. Penso che avrei bisogno del supporto di una persona già in grado di utilizzare il sistema</i>	77,78%	0,00%	11,11%	11,11%	0,00%
<i>5. Ho trovato le varie funzionalità del sistema bene integrate</i>	5,56%	0,00%	5,56%	22,22%	66,67%
<i>6. Ho trovato incoerenze tra le varie funzionalità del sistema</i>	94,44%	5,56%	0,00%	0,00%	0,00%
<i>7. Penso che la maggior parte delle persone potrebbero imparare ad utilizzare il sistema facilmente</i>	0,00%	5,56%	0,00%	16,67%	77,78%
<i>8. Ho trovato il sistema molto macchinoso da utilizzare</i>	77,78%	11,11%	11,11%	0,00%	0,00%
<i>9. Ho avuto molta confidenza con il sistema durante l'uso</i>	5,56%	0,00%	16,67%	27,78%	50,00%
<i>10. Ho avuto bisogno di imparare molti processi prima di riuscire ad utilizzare al meglio il sistema</i>	83,33%	11,11%	5,56%	0,00%	0,00%



I risultati dei questionari SUS somministrati sull'exergame Aereo hanno restituito un punteggio complessivo di 89, un valore estremamente positivo, significativamente superiore al punteggio di riferimento di 68. Tale punteggio evidenzia l'ottimo risultato ottenuto con questo exergame dal punto di vista dell'usabilità e dal punto di vista dell'apprezzamento da parte degli utenti. L'esperienza di gioco offerta ha quindi superato positivamente le aspettative e ha raggiunto livelli di usabilità ottimali.

Nello specifico, il primo elemento che risalta dai risultati è l'apprezzamento unanime da parte di tutti i partecipanti (100%), che infatti sono d'accordo o molto d'accordo nell'affermare che avrebbero piacere di riutilizzare il gioco in futuro (domanda 1). Il tipo di esercizio e l'ambientazione sembrano quindi essere più apprezzati rispetto all'exergame Tastiera. Oltre a ciò, l'88,89% dei partecipanti ha dichiarato che il gioco non è risultato complesso (domanda 2). Anche per quanto riguarda la facilità d'uso, il 77,78% afferma di non avere incontrato difficoltà nell'utilizzo (domanda 3), mentre solo il 5,56% ha riscontrato problemi. Questi risultati trovano conferma anche nei dati riguardanti la necessità di supporto per l'utilizzo del sistema, in cui sempre il 77,78% afferma di non averne bisogno, mentre un 11% circa afferma il contrario. Considerando la composizione del campione, è plausibile che le persone meno giovani e meno abituate a questo tipo di sistemi abbiano maggiori necessità di supporto iniziale, quantomeno per i primi utilizzi. Secondo l'88,89% dei partecipanti, le funzionalità del sistema risultano ben integrate (domanda 5) e solo il 5% circa ha affermato il contrario. Il risultato è confermato anche dal 100% di risposte che affermano come non si notino incoerenze tra le varie funzionalità del sistema (domanda 6). La facilità d'uso è ulteriormente confermata dal 94,45% del campione, il quale afferma che la maggior parte delle persone potrebbe imparare facilmente ad utilizzare il sistema (domanda 7). Inoltre, nessun partecipante (0%) ha trovato il sistema macchinoso e anzi il 77,78% afferma di non aver riscontrato criticità in tal senso (domanda 8).

Durante l'utilizzo circa il 77% del campione afferma di aver avuto confidenza con il sistema, di cui il 50% molta confidenza, mentre solo il 5% circa non ne ha avuta (domanda 9). Infine, il processo di apprendimento per l'utilizzo del sistema sembra non essere lungo e complicato, in quanto il 94,45% del campione afferma di non aver dovuto imparare molti processi prima di poter utilizzarlo (domanda 10).

In conclusione, pur mostrando una complessità leggermente maggiore rispetto all'exergame Tastiera, l'exergame Aereo risulta avere un alto livello di usabilità e una facilità di utilizzo elevata. Inoltre, sembra riscontrare un interesse e un gradimento maggiore rispetto alla tastiera, soddisfacendo maggiormente gli obiettivi di gamification ricercati in questo tipo di exergames riabilitativi.

## Exergame Sci di fondo

	<b>1 – Non d'accordo</b>	<b>2 – Poco d'accordo</b>	<b>3 – Neutrale</b>	<b>4 – Abbastanza d'accordo</b>	<b>5 – Molto d'accordo</b>
<i>1. Penso che mi piacerebbe utilizzare questo sistema frequentemente</i>	0,00%	5,56%	16,67%	33,33%	44,44%
<i>2. Ho trovato il sistema complesso senza che ce ne fosse bisogno</i>	55,56%	11,11%	16,67%	11,11%	5,56%
<i>3. Ho trovato il sistema molto semplice da usare</i>	0,00%	27,78%	27,78%	16,67%	27,78%

4. Penso che avrei bisogno del supporto di una persona già in grado di utilizzare il sistema	44,44%	11,11%	22,22%	16,67%	5,56%
5. Ho trovato le varie funzionalità del sistema bene integrate	0,00%	0,00%	22,22%	38,89%	38,89%
6. Ho trovato incoerenze tra le varie funzionalità del sistema	66,67%	11,11%	11,11%	11,11%	0,00%
7. Penso che la maggior parte delle persone potrebbero imparare ad utilizzare il sistema facilmente	0,00%	22,22%	16,67%	27,78%	33,33%
8. Ho trovato il sistema molto macchinoso da utilizzare	33,33%	16,67%	33,33%	16,67%	0,00%
9. Ho avuto molta confidenza con il sistema durante l'uso	5,56%	27,78%	22,22%	38,89%	5,56%
10. Ho avuto bisogno di imparare molti processi prima di riuscire ad utilizzare al meglio il sistema	44,44%	22,22%	27,78%	5,56%	0,00%

I risultati dei questionari SUS somministrati sull'exergame Sci di fondo hanno restituito un punteggio complessivo di 71, un valore che indica un buon livello di usabilità dell'exergame. Infatti, è poco superiore al valore di 68, che rappresenta il punteggio minimo per considerare un sistema facilmente usabile.

Entrando più nel dettaglio, i risultati mostrano un buon apprezzamento da parte dei partecipanti nei confronti dell'exergame, anche se non al livello dell'exergame Aereo. Infatti, il 77,77% di loro afferma che vorrebbe utilizzare il gioco frequentemente, mentre solo il 5% pensa il contrario (domanda 1). Data la complessità del movimento richiesto dal gioco, non sorprende che lo Sci di Fondo sia l'exergame con un punteggio inferiore rispetto agli altri dal punto di vista della complessità di utilizzo. Infatti, il 16,67% dei partecipanti afferma di aver trovato il sistema inutilmente complesso, mentre per il 27,78% di essi l'exergame non è risultato facile da usare. Anche le percentuali di risposte positive per queste due domande non raggiungono i livelli degli altri exergames, con solo il 66,67% delle persone che non hanno trovato il sistema inutilmente complesso o per niente complesso e il 44,45% che ha trovato il sistema semplice o molto semplice da usare.

Anche la necessità di avere supporto per poter utilizzare il sistema è stata riscontrata da un numero maggiore di persone, ovvero il 22,23%. Nonostante ciò, la maggioranza (55,55%) afferma di non aver necessità di supporto da persone già in grado di utilizzare il sistema.

Questi risultati, leggermente negativi rispetto agli altri exergames, si spiegano constatando empiricamente che questo exergame richiede un tempo di apprendimento maggiore, in quanto risulta intrinsecamente il più complesso.

Nonostante ciò, le funzionalità del sistema sembrano essere ben integrate e coerenti, come afferma il 77,78% dei partecipanti. Invece, per quanto riguarda la facilità con cui la maggior parte delle persone potrebbe imparare ad utilizzare il sistema si riscontrano risultati simili a quelli riguardo la complessità e la facilità di utilizzo. Infatti, il 22,22% dei partecipanti non si trova d'accordo con questa affermazione, mentre è d'accordo solamente circa il 61% di loro.

Oltre a ciò, il 50% del campione afferma di aver trovato il sistema macchinoso e solamente il 16,67% di esso afferma il contrario. Ciò si ripercuote anche nella confidenza nell'utilizzo, in quanto solo il 44,45% dei partecipanti ha sentito confidenza con il sistema, mentre il 33,34% è di opinione contraria. Infine, risultati migliori si riscontrano dal punto di vista dei processi da imparare per poter utilizzare l'exergame. Il 66,66% dei partecipanti ha infatti affermato di non aver dovuto imparare molti procedimenti prima dell'utilizzo, solo il 5,56% afferma il contrario.

In conclusione, i partecipanti alle sessioni di test hanno riscontrato maggiori difficoltà di utilizzo e maggiore complessità nell'exergame Sci di Fondo rispetto agli altri exergames. Come accennato in precedenza, i movimenti richiesti dal gioco sono più complessi e ciò si ripercuote anche sull'esperienza di gioco. Inoltre, esso richiede maggior tempo per poter prendere confidenza con i vari livelli del gioco e questa fase di test non ha previsto un numero sufficiente di prove per far esercitare adeguatamente i partecipanti.

## Affaticamento

Oltre all'usabilità, durante la fase di test in cui sono stati fatti provare gli exergames a 32 soggetti sani, oltre al questionario SUS, è stato somministrato anche il questionario NASA-TLX al fine di misurare il livello di affaticamento dei partecipanti. Esso è un questionario standard utilizzato per valutare il livello di fatica e il carico di lavoro percepito dagli utilizzatori di un sistema.

Anche in questo caso è stato somministrato un questionario per ogni exergames e pertanto i risultati verranno mostrati speratamente, exergames per exergames, dopo una piccola descrizione su cos'è il questionario NASA-TLX e come è strutturato.

## Questionario NASA Task Load Index

Il questionario Nasa Task Load Index (NASA – TLX) è uno strumento ampiamente utilizzato per valutare il carico di lavoro percettivo e cognitivo associato a compiti specifici. Sviluppato dall'Agenzia Spaziale Americana (NASA), offre un approccio sistematico per misurare il carico di lavoro soggettivo percepito da individui impegnati in attività complesse o specifiche. La valutazione comprende diversi aspetti, tra cui l'impegno mentale, lo sforzo fisico, lo sforzo temporale, le prestazioni, la frustrazione e la percezione del successo. L'impegno mentale riflette la richiesta cognitiva del sistema, lo sforzo fisico considera l'impegno fisico richiesto, lo sforzo temporale valuta la pressione percepita a livello di tempo, le prestazioni riflettono il giudizio soggettivo sulla propria performance, la frustrazione misura il grado di stress o disagio emotivo, mentre la percezione del successo rappresenta il grado di soddisfazione rispetto al completamento del compito.

Il questionario è composto una domanda per ogni dominio a cui è possibile rispondere assegnando un punteggio su una scala da 0 a 100, dove il punteggio più alto indica un maggiore carico di lavoro.

Il questionario è progettato per valutare quattro dimensioni della facilità d'uso di un sistema, ovvero l'efficacia, l'efficienza, l'effetto desiderato, che misura quanto l'utente trova il sistema piacevole e soddisfacente, e la memorabilità, che invece misura quanto l'utente è in grado di ricordare come usare il sistema.

## Exergame Tastiera

	<b>1 - 4</b>	<b>5 - 8</b>	<b>9 - 12</b>	<b>13 - 16</b>	<b>17 - 20</b>
<i>Quanto è stato impegnativo mentalmente il compito?</i>	72,22%	22,22%	5,56%	0,00%	0,00%
<i>Quanto è stato impegnativo fisicamente il compito?</i>	44,44%	33,33%	11,11%	11,11%	0,00%
<i>Quanto è stato frettoloso o affrettato il ritmo del compito?</i>	61,11%	33,33%	5,56%	0,00%	0,00%
<i>Quanto siete riusciti a realizzare ciò che vi era stato chiesto?</i>	0,00%	0,00%	16,67%	22,22%	61,11%
<i>Quanto avete dovuto lavorare per raggiungere il vostro livello di prestazioni?</i>	33,33%	44,44%	16,67%	0,00%	0,00%
<i>Quanto eravate insicuri, scoraggiati, irritati, stressati e infastiditi?</i>	66,67%	22,22%	5,56%	0,00%	0,00%

I risultati del NASA-TLX riguardante l'exergame Tastiera mostrano che il gioco non è particolarmente oneroso a livello di sforzo mentale, in quanto il 72,23% dei partecipanti ha affermato che non ha richiesto alcun tipo di impegno mentale e il 22,22% un minimo impegno. A livello fisico invece i risultati sembrano essere più vari, anche se la maggioranza afferma che lo sforzo richiesto sia stato minimo o quasi nullo. Il 44% circa del campione ha risposto che lo sforzo fisico richiesto è stato molto basso, mentre solo un 11% circa ha affermato che l'impegno fisico richiesto è stato alto. Inoltre, l'exergame non risulta essere frettoloso nei ritmi proposti agli utenti e la quasi totalità dei partecipanti ha affermato di aver raggiunto gli obiettivi richiesti dal gioco. La maggioranza del campione, circa il 61%, ha risposto in maniera positiva al quesito inerente al tempo impiegato per raggiungere il proprio livello di prestazione. Anche per quanto concerne eventuale stress o insicurezza causati dall'applicazione, la maggioranza dei partecipanti ha risposto in maniera positiva. Il 100% di essi ha infatti affermato di non aver provato nessuna sensazione negativa e tutte le risposte risultano nel range di valori positivi per quanto riguarda questo ultimo quesito.

Questi elementi evidenziano quanto già è stato stimato tramite il questionario SUS, ovvero che l'exergame non risulta particolarmente complesso e anzi denota una certa semplicità nell'utilizzo.

## Exergame Aereo

	<b>1 - 4</b>	<b>5 - 8</b>	<b>9 - 12</b>	<b>13 - 16</b>	<b>17 - 20</b>
<i>Quanto è stato impegnativo mentalmente il compito?</i>	61,11%	22,22%	11,11%	5,56%	0,00%
<i>Quanto è stato impegnativo fisicamente il compito?</i>	16,67%	38,89%	27,78%	11,11%	5,56%
<i>Quanto è stato frettoloso o affrettato il ritmo del compito?</i>	33,33%	38,89%	22,22%	5,56%	0,00%
<i>Quanto siete riusciti a realizzare ciò che vi era stato chiesto?</i>	0,00%	0,00%	5,56%	38,89%	55,56%
<i>Quanto avete dovuto lavorare per raggiungere il vostro livello di prestazioni?</i>	27,78%	44,44%	22,22%	5,56%	0,00%
<i>Quanto eravate insicuri, scoraggiati, irritati, stressati e infastiditi?</i>	77,78%	16,67%	0,00%	0,00%	5,56%

I risultati relativi all'exergame Aereo indicano che dal punto di vista dello sforzo mentale, l'exergame non risulta particolarmente impegnativo, eccezion fatta per una piccola percentuale dei partecipanti che lo classifica come mediamente impegnativo. Dal punto di vista fisico invece esso sembra richiedere uno sforzo maggiore, poiché circa il 44% del campione dichiara di essersi almeno mediamente impegnato.

Il ritmo del gioco non sembra essere eccessivamente veloce, dato che quasi tutti i partecipanti (il 94,44%) hanno dichiarato di non aver percepito fretta, o al massimo di averla percepita in maniera minore. Inoltre, la maggioranza del campione sostiene di aver raggiunto gli obiettivi richiesti dall'exergame senza dover lavorare o impegnarsi eccessivamente. Per quanto riguarda la percezione di insicurezza, scoraggiamento, irritazione, stress o fastidio non emergono problematiche significative, se non per un piccolo 5% circa del campione che ha affermato di aver percepito una o alcune di queste sensazioni.

Dunque, dall'analisi dei risultati non emergono criticità particolari riguardanti questo exergame. Esso risulta leggermente più impegnativo a livello fisico dell'exergame Tastiera, tuttavia senza raggiungere livelli di sforzo fisico allarmanti.

## Exergame Sci di fondo

	1 - 4	5 - 8	9 - 12	13 - 16	17 - 20
<i>Quanto è stato impegnativo mentalmente il compito?</i>	22,22%	44,44%	22,22%	0,00%	11,11%
<i>Quanto è stato impegnativo fisicamente il compito?</i>	5,56%	22,22%	44,44%	22,22%	5,56%
<i>Quanto è stato frettoloso o affrettato il ritmo del compito?</i>	50,00%	22,22%	22,22%	5,56%	0,00%
<i>Quanto siete riusciti a realizzare ciò che vi era stato chiesto?</i>	5,56%	16,67%	27,78%	22,22%	27,78%
<i>Quanto avete dovuto lavorare per raggiungere il vostro livello di prestazioni?</i>	16,67%	11,11%	38,89%	22,22%	11,11%
<i>Quanto eravate insicuri, scoraggiati, irritati, stressati e infastiditi?</i>	55,56%	16,67%	5,56%	22,22%	0,00%

I risultati del questionario NASA-TLX sull'exergame Sci di fondo mostrano che esso risulta leggermente più impegnativo a livello mentale rispetto ai precedenti, poiché la distribuzione dei punteggi riguardo a questo aspetto è maggiormente concentrata su valori non bassi. A livello fisico invece, si osserva una netta differenza rispetto agli altri exergames: solamente il 27,78% dei partecipanti afferma di non averlo trovato fisicamente impegnativo. Tutti gli altri partecipanti hanno riportato livelli intermedi o alti di fatica fisica. Questo risultato è coerente con quanto emerso dai questionari SUS e si spiega ponendolo in relazione al movimento richiesto per l'esecuzione del gioco, più impegnativo e complesso rispetto agli altri.

Il ritmo del gioco, d'altra parte, non sembra essere frettoloso o affrettato, poiché la maggioranza dei partecipanti ha dichiarato di non averlo trovato veloce o al massimo di averlo trovato nella mediamente veloce.

Tuttavia, risulta meno positivo quanto emerge riguardo alla percezione di aver realizzato ciò che era stato chiesto. Circa il 66% dei partecipanti ha segnalato difficoltà in tal senso, di cui l'11% in maniera netta. Anche per quanto riguarda l'impegno necessario a raggiungere il proprio livello di prestazione si notano maggiori difficoltà, con circa il 33% che reputa di aver dovuto lavorare parecchio.

In termini di percezione di insicurezza, scoraggiamento, irritazione, stress o fastidio invece, i risultati migliorano leggermente, con solo circa il 21% del campione che afferma di aver provato una o alcune di queste sensazioni.

L'analisi emersa dai questionari NASA-TLX suggerisce quindi che l'exergame Sci di Fondo risulta il più complesso e faticoso, richiedendo maggiore impegno e tempo per acquisire confidenza con i movimenti richiesti e raggiungere determinati obiettivi.

## Risultati di gioco

Durante le sessioni di test effettuate su soggetti sani sono stati raccolti i dati di gioco di ciascuna prova ed è stato possibile effettuare delle analisi sulle prestazioni degli utenti.

In particolare, per l'exergames Tastiera, l'analisi è stata eseguita utilizzando i dati relativi al numero di errori commessi e al tempo di gioco di ciascun utente. Invece, per gli exergames Aereo e Sci di Fondo

sono state realizzate delle heatmap delle posizioni dei rispettivi avatar di gioco, raccogliendo i dati delle sessioni di prova di tutti e 32 i partecipanti.

Come anticipato nell'introduzione del capitolo, ciascun partecipante ai test ha eseguito due prove per ogni exergame: prima il livello più facile e successivamente quello più difficile. Pertanto, nelle analisi degli exergames Aereo e Sci di fondo, verranno considerati due casi per ciascun exergame, quello relativo al livello facile e quello relativo al livello difficile.

## Exergame Tastiera

L'analisi dei dati di gioco per l'exergame Tastiera ha richiesto un approccio diverso rispetto alle altre due applicazioni. La creazione di una heatmap che includa tutte le posizioni della mano virtuale durante tutte le sessioni di prova di tutti gli utenti non avrebbe fornito informazioni utili per l'analisi, poiché i movimenti richiesti ai giocatori sono casuali e determinati in base alla sequenza di tasti da seguire.

Pertanto, per condurre un'analisi significativa, gli unici parametri rilevanti risultano essere il numero di errori commessi dagli utenti e il tempo impiegato per completare ogni livello. Tuttavia, a causa del numero limitato di sessioni di prova per utente, solitamente pari a due, e della diversità dei livelli di gioco affrontati in queste sessioni, le possibilità di analisi risultano notevolmente limitate a causa della mancanza di dati comparabili.

Nonostante questa limitazione, è stato possibile effettuare un'analisi, seppur limitata, ponendo il numero di errori e il tempo di gioco di ciascun utente in relazione al numero di tasti cliccati, il quale indica il livello di difficoltà della prova. Questo approccio ha reso possibile il confronto tra le diverse sessioni di gioco di ciascun utente, anche se affrontate con livelli di difficoltà differenti.

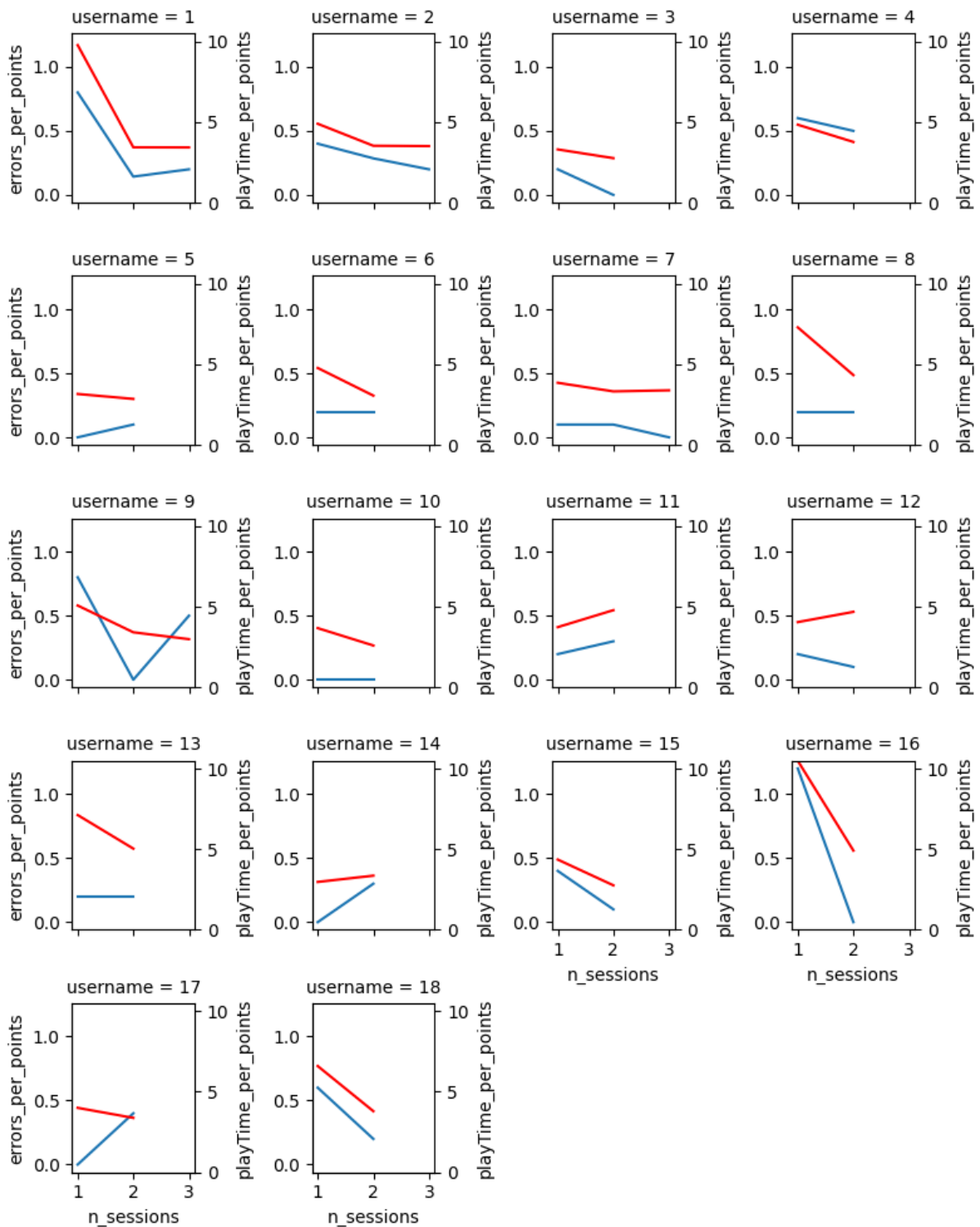


FIGURA 36 - GRAFICI ERRORI PER PUNTI (LINEA BLU) E TEMPO DI GIOCO PER PUNTI (LINEA ROSSA)

Dall'analisi di questi dati si osserva che, nelle limitate sessioni di gioco a disposizione, alcuni utenti sono riusciti a migliorare il proprio livello di prestazione, mentre altri lo hanno mantenuto invariato. Inoltre, non emergono tendenze peggiorative condivise tra diversi utenti.

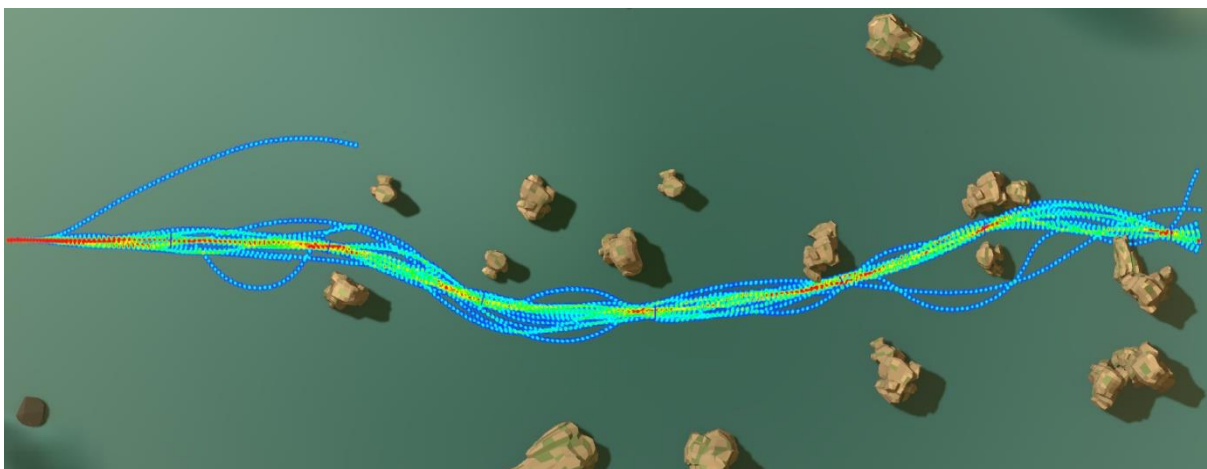
Analizzando i grafici riportati in figura X, si osserva come per molti utenti sia il parametro "errors\_per\_points" (numero di errori in rapporto al numero di tasti cliccati, linea azzurra) sia il parametro "playTime\_per\_points" (tempo di gioco in rapporto al numero di tasti cliccati, linea rossa)

mostrano un andamento decrescente per entrambi o per almeno uno di essi. Ciò indica che la maggioranza degli utenti è riuscita a migliorare la precisione, la velocità di esecuzione, o entrambi, da una sessione all'altra. L'unico caso in cui nessuno dei due parametri è migliorato riguarda l'utente 11, per il quale entrambi i valori sono leggermente aumentati.

Al fine di garantire un'analisi più robusta, sarebbe necessario condurre ulteriori sessioni di gioco per ciascun utente. Tuttavia, nonostante questa necessità, sembra che il gioco non presenti criticità significative per questo tipo di utenti. Al contrario, si possono già osservare miglioramenti nell'utilizzo del gioco da parte dei giocatori. Questa percezione è corroborata dai risultati ottenuti attraverso i questionari SUS e NASA-TLX, i quali indicano che il gioco risulta essere semplice e poco impegnativo a livello di affaticamento.

## Exergame Aereo

### Livello facile



**FIGURA 37 - HEATMAP LIVELLO FACILE AEREO - INIZIA A SINISTRA**

L'heatmap risultante del livello facile dell'exergame Aereo pone in evidenza come la maggioranza degli utenti abbia seguito il percorso prestabilito necessario per attraversare il maggior numero possibile di cerchi blu, come richiesto dal gioco. Si osservano solo alcune traiettorie fuori dal percorso corretto all'inizio e verso la fine del livello.

In generale si può quindi affermare che non ci siano particolari zone critiche nel gioco e che il livello sia facile da completare per la maggior parte degli utenti. Le uniche criticità riscontrabili sono invece riconducibili al fatto che esso costituisce il primo livello del gioco, rappresentando quindi il primissimo approccio per la maggioranza degli utilizzatori.



## Livello difficile

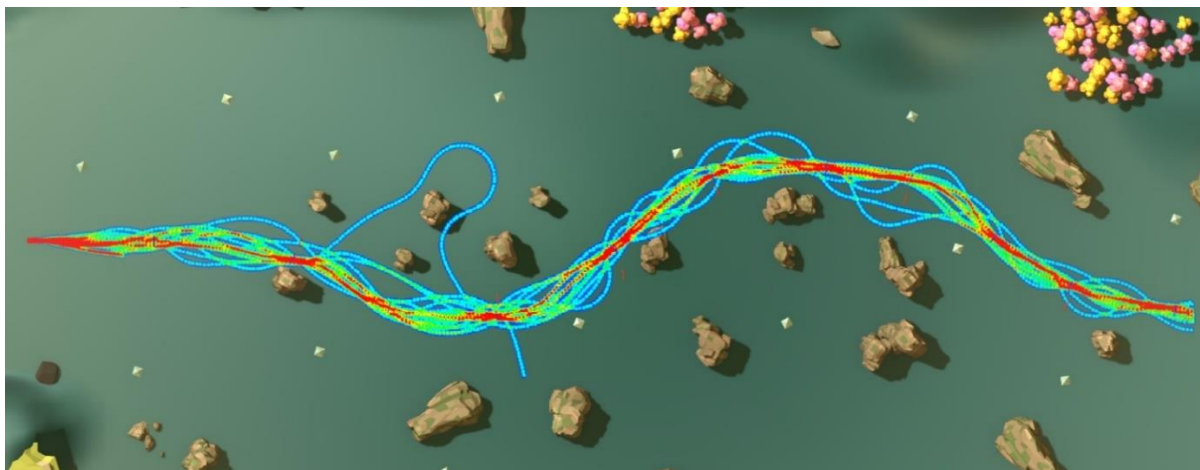


FIGURA 38 - HEATMAP LIVELLO DIFFICILE AEREO - INIZIA A SINISTRA

Per quanto riguarda il livello Difficile, l'heatmap corrispondente conferma quanto visto in precedenza per il livello facile, poiché in figura è facilmente riconoscibile una traiettoria rossa più seguita dagli utenti, corrispondente al percorso più adatto per attraversare più anelli blu possibili. Ciò evidenzia come la maggior parte degli utenti non abbia riscontrato particolari problemi durante il livello. Nonostante la difficoltà del decollo iniziale, inoltre, non si osservano traiettorie particolarmente anomale, ad eccezione di alcune leggermente più ampie e dell'unica significativamente fuori percorso dopo la parte iniziale del livello. Essa si conclude in mezzo al nulla, dove probabilmente il giocatore ha fermato il gioco al fine di ritentare il livello.

Nelle fasi centrali del livello si notano alcune traiettorie a zig-zag, probabilmente dovute alla presenza degli anelli, sia quelli blu da attraversare, sia quelli rossi da evitare, che hanno richiesto manovre correttive da parte dei giocatori. È importante sottolineare che per la maggior parte di loro, questo livello ha rappresentato solamente la seconda esperienza con l'exergame.

In conclusione, si può affermare che il livello non abbia evidenziato punti particolarmente critici in cui i giocatori hanno mostrato difficoltà. Al contrario, la maggior parte di loro ha seguito la traiettoria corretta ed ha completato con successo il livello, come chiaramente indicato dalle tracce rosse nella heatmap.

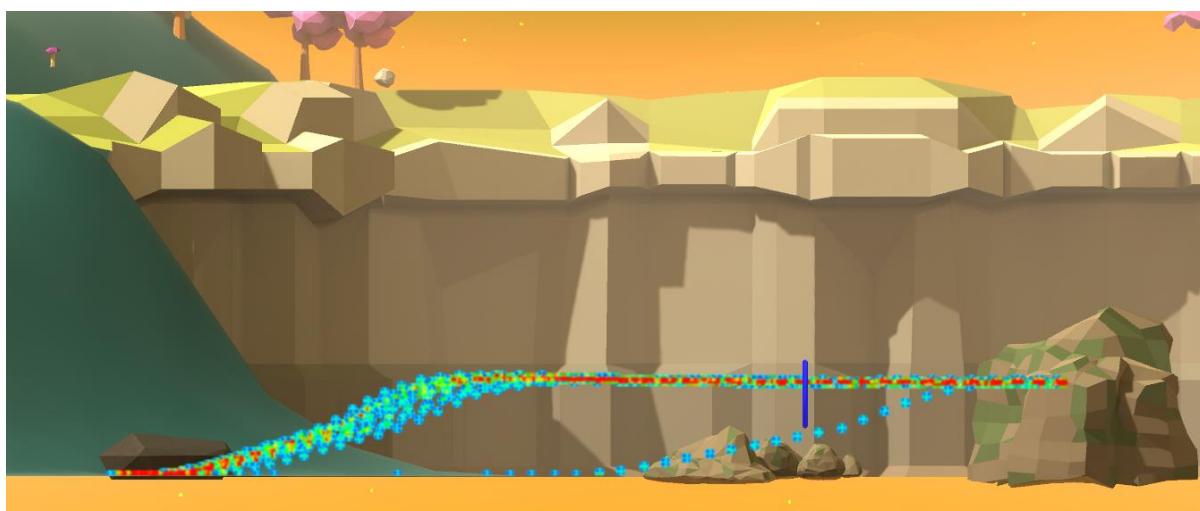


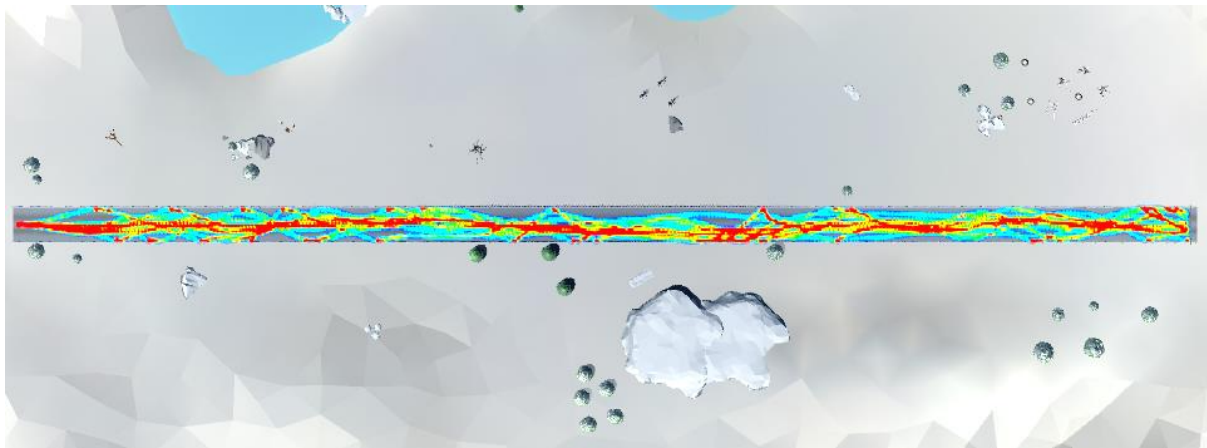
FIGURA 39 - HEATMAP DECOLLO LIVELLO DIFFICILE AEREO - INIZIA DA SINISTRA

Il livello difficile del gioco è caratterizzato anche da una fase di decollo iniziale che viene analizzata in figura X, in cui sono state considerate le posizioni y (altitudine) dell'aereo durante tutte le sessioni di test. Si osserva che nessun partecipante ha riscontrato particolari difficoltà durante questa. Infatti, in tutte le sessioni di prova analizzate, gli utenti siano riusciti con successo a far decollare l'aereo. Solo in un caso, evidenziato in figura da una traiettoria più bassa, un utente ha incontrato delle difficoltà nel far decollare l'aereo con le stesse tempistiche degli altri partecipanti. Tuttavia, è riuscito a raggiungere l'obiettivo successivamente, dopo il primo anello blu.

In generale, in figura si nota una traiettoria più accentuata che dimostra come la fase di decollo non sia particolarmente complessa e difficile. In fase di sviluppo è stata presa la decisione di semplificare questa fase, considerando che l'exergame è rivolto a pazienti ospedalieri e l'obiettivo è di non aumentare eccessivamente la difficoltà di gioco.

## Exergame Sci di fondo

### Livello facile – Rettilineo



**FIGURA 40 - HEATMAP PISTA RETTILINEA SCI - INIZIA A SINISTRA**

Nel primo livello dell'exergame Sci di fondo, i giocatori devono percorrere una pista rettilinea fino al traguardo, cercando di raccogliere le gemme lungo il percorso. L'heatmap corrispondente a questo livello mostra che la maggioranza degli utenti ha seguito il percorso corretto necessario per raccogliere più gemme possibili. Un tracciato rosso più evidente è chiaramente visibile. Tuttavia, vanno segnalate alcune aree rosse lungo i bordi della pista, particolarmente frequenti nella parte iniziale, che denotano le difficoltà di alcuni giocatori nel rimanere al centro della pista. Dopo la parte iniziale del livello, si osservano meno aree rosse vicino ai bordi, suggerendo che molti utenti, dopo alcune collisioni con i bordi della pista nella prima parte del tracciato, abbiano acquisito maggiore confidenza e siano migliorati nel controllo dell'avatar di gioco.

In generale, si osservano alcune difficoltà iniziali nella gestione dell'avatar, soprattutto nel curvare e nel mantenere la traiettoria desiderata. La gestione del movimento richiesto dal gioco e la rotazione delle braccia risultano infatti inizialmente complesse per qualsiasi persona. Considerando che per la maggior parte degli utenti è il loro primo approccio con il gioco, è naturale affrontare una fase iniziale di adattamento per comprendere le dinamiche e come i propri movimenti influiscano sul gioco. Tuttavia, si nota un miglioramento delle traiettorie con il prosieguo del livello. È importante sottolineare che le gemme sono disposte in modo tale da richiedere delle leggere sterzate da parte del giocatore; pertanto, è normale che risultino sterzate più o meno brusche nelle traiettorie effettuate dai giocatori.

## Livello difficile – Circuito chiuso

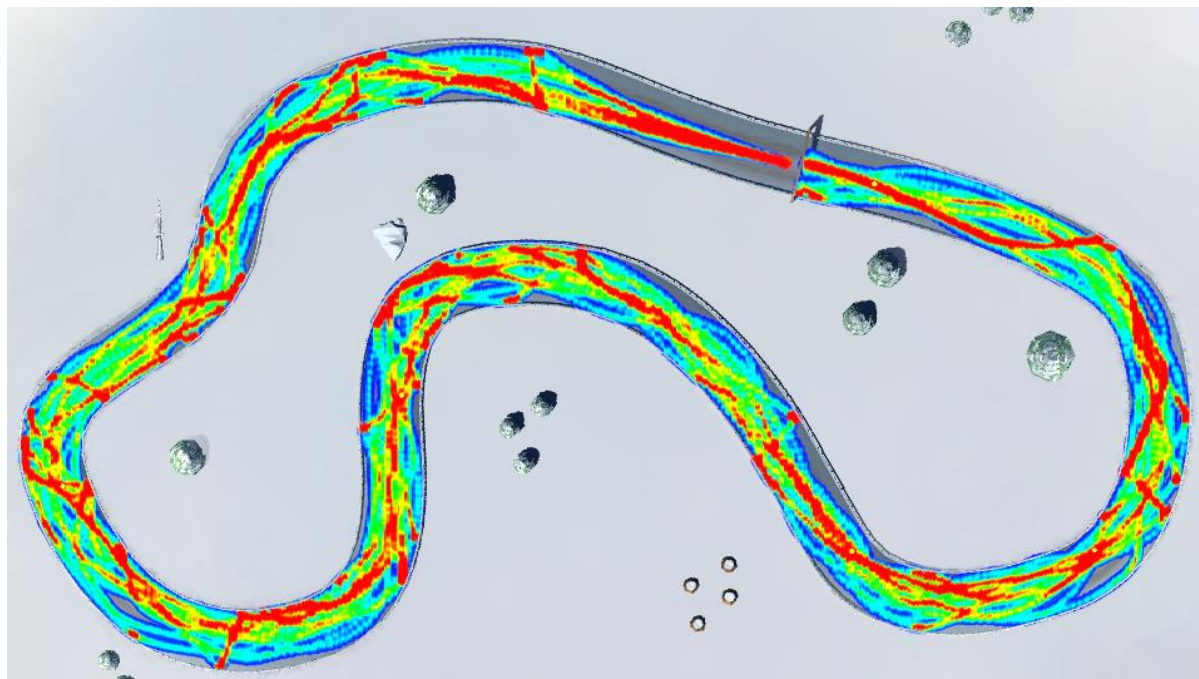


FIGURA 41 - HEATMAP CIRCUITO CHIUSO SCI - VA IN SENSO ANTIORARIO

Nel livello difficile, corrispondente ad un circuito chiuso, l'heatmap delle traiettorie seguite dagli utenti durante le sessioni di test evidenzia ulteriori difficoltà da parte di essi nel curvare, simile a quanto visto in precedenza per il livello facile. Infatti, un percorso seguito dalla maggioranza degli utenti non è chiaramente identificabile, tranne che nei tratti iniziali del livello, dove si distingue chiaramente una linea rossa. Si osservano aree rosse in presenza di molte curve, soprattutto le iniziali, che evidenziano le difficoltà di molti utenti nel curvare tempestivamente per evitare collisioni contro le barriere laterali. Al contrario, nell'ultima curva più larga si evidenziano meno difficoltà da parte degli utenti, con meno zone rosse ai bordi della pista, ad eccezione del tratto finale prima del traguardo.

Questo livello risulta quindi aver comportato maggiori difficoltà per gli utenti nel curvare correttamente e nel mantenere la traiettoria migliore. È importante sottolineare che esso rappresenta il livello più difficile e che per la maggior parte degli utenti è stata solo la seconda volta in cui hanno provato il gioco. Il livello risulta sfidante e impegnativo, anche se non in maniera eccessiva, poiché la maggior parte degli utenti è stata in grado di completare il livello in tempi consoni.

Nel caso risulti necessario facilitare il livello, potenziali modifiche potrebbero includere l'ampiamiento della pista e la mitigazione di alcune curve, al fine di agevolare il compito degli utenti nel cambiare direzione e mantenere una posizione centrale nel percorso. Queste modifiche potrebbero rivelarsi utili per migliorare l'usabilità, in particolare per gli utenti di riferimento dell'applicazione, ovvero i pazienti ospedalieri affetti da Parkinson o post-Ictus.

## Risultati sperimentazione pazienti Post-Ictus

Gli exergames sono stati utilizzati durante una sperimentazione eseguita su soggetti con postumi di ictus in ambito ospedaliero con la supervisione del personale sanitario presso la UO di Neurologia e Neuroriabilitazione dell'Ospedale San Giuseppe di Piancavallo, struttura dell'Istituto Auxologico Italiano, e presso UPO, AO Maggiore di Novara, rep. Fisiatria.

Per la sperimentazione sono stati reclutati 7 pazienti emiparetici con le seguenti caratteristiche: 4 con emiparesi sinistra e 3 emiparesi destra, 4 maschi e 3 femmine, età  $70,28 \pm 14,62$  e con un tempo dall'evento acuto di  $5,7 \pm 2,6$  anni. La totalità dei pazienti non presenta una grave disabilità agli arti

superiori e agli arti inferiori (hanno la possibilità di deambulare). Il ciclo riabilitativo attraverso exergames è stato avviato dopo una fase iniziale di valutazione da parte dei terapeuti, in cui si è effettuata un'analisi del cammino, della postura con occhi aperti e chiusi e della funzionalità della mano.

La sperimentazione è stata suddivisa in due sessioni riabilitative, in cui la prima è stata utilizzata per far prendere ai pazienti confidenza con la tecnologia e l'uso delle applicazioni. La seconda è stata invece utilizzata per la raccolta dei dati e dei risultati per la valutazione della sperimentazione.

Paziente	Grafico tempo di utilizzo exergames (per sessione)	Dati e osservazioni																																				
EM001	<p>Tempo di esecuzione degli exergames</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sessione Riabilitativa</th> <th>SCI</th> <th>AEREO</th> <th>TASTIERA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R2</td> <td>753.70</td> <td>56.72</td> <td>23.28</td> </tr> <tr> <td>R3</td> <td>577.17</td> <td>52.56</td> <td>16.67</td> </tr> <tr> <td>R4</td> <td>182.61</td> <td>54.23</td> <td>14.27</td> </tr> <tr> <td>R5</td> <td>194.04</td> <td>52.43</td> <td>1.52</td> </tr> <tr> <td>R6</td> <td>142.96</td> <td>52.36</td> <td>14.51</td> </tr> <tr> <td>R7</td> <td>294.61</td> <td>52.55</td> <td>12.83</td> </tr> <tr> <td>R8</td> <td>196.56</td> <td>52.59</td> <td>25.01</td> </tr> <tr> <td>R9</td> <td>82.16</td> <td>52.12</td> <td>19.70</td> </tr> </tbody> </table>	Sessione Riabilitativa	SCI	AEREO	TASTIERA	R2	753.70	56.72	23.28	R3	577.17	52.56	16.67	R4	182.61	54.23	14.27	R5	194.04	52.43	1.52	R6	142.96	52.36	14.51	R7	294.61	52.55	12.83	R8	196.56	52.59	25.01	R9	82.16	52.12	19.70	<ul style="list-style-type: none"> <li>8 sessioni riabilitative eseguite (tutti gli exergames)</li> <li>sessioni completate: SCI (8/8), AEREO (8/8), TASTIERA* (7/8)</li> </ul> <p>*Sessione TASTIERA non completata eseguita con braccio SX</p> <p><b>Risultato:</b> Il tempo di completamento dello SCI diminuisce con il progredire delle sessioni riabilitative.</p>
Sessione Riabilitativa	SCI	AEREO	TASTIERA																																			
R2	753.70	56.72	23.28																																			
R3	577.17	52.56	16.67																																			
R4	182.61	54.23	14.27																																			
R5	194.04	52.43	1.52																																			
R6	142.96	52.36	14.51																																			
R7	294.61	52.55	12.83																																			
R8	196.56	52.59	25.01																																			
R9	82.16	52.12	19.70																																			
EM002	<p>Tempo di esecuzione degli exergames</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sessione Riabilitativa</th> <th>SCI</th> <th>AEREO</th> <th>TASTIERA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R2</td> <td>229.16</td> <td>54.03</td> <td>15.20</td> </tr> <tr> <td>R3</td> <td>135.33</td> <td>52.80</td> <td>12.70</td> </tr> </tbody> </table>	Sessione Riabilitativa	SCI	AEREO	TASTIERA	R2	229.16	54.03	15.20	R3	135.33	52.80	12.70	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 sessioni riabilitative eseguite (tutti gli exergames)</li> <li>sessioni completate: SCI (2/2), AEREO (2/2), TASTIERA* (2/2)</li> </ul> <p>*Sessioni TASTIERA eseguite con braccio DX</p> <p><b>Risultato:</b> Il tempo di completamento dello SCI diminuisce con il progredire delle sessioni riabilitative.</p>																								
Sessione Riabilitativa	SCI	AEREO	TASTIERA																																			
R2	229.16	54.03	15.20																																			
R3	135.33	52.80	12.70																																			
EM003	<p>Tempo di esecuzione degli exergames</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sessione Riabilitativa</th> <th>TASTIERA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R2</td> <td>23.68</td> </tr> <tr> <td>R3</td> <td>46.38</td> </tr> <tr> <td>R4</td> <td>19.87</td> </tr> <tr> <td>R5</td> <td>25.04</td> </tr> </tbody> </table>	Sessione Riabilitativa	TASTIERA	R2	23.68	R3	46.38	R4	19.87	R5	25.04	<ul style="list-style-type: none"> <li>4 sessioni riabilitative eseguite (solo TASTIERA)</li> <li>sessioni completate: TASTIERA* (4/4)</li> </ul> <p>*Sessioni TASTIERA eseguite con braccio DX (3) e SX (1)</p> <p><b>Risultato:</b> Il tempo di completamento della TASTIERA diminuisce con il progredire delle sessioni riabilitative. Diminuiscono le "pause" durante il gioco.</p>																										
Sessione Riabilitativa	TASTIERA																																					
R2	23.68																																					
R3	46.38																																					
R4	19.87																																					
R5	25.04																																					
EM004	<p>Tempo di esecuzione degli exergames</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Sessione Riabilitativa</th> <th>SCI</th> <th>AEREO</th> <th>TASTIERA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R2</td> <td>150.69</td> <td>54.38</td> <td>41.97</td> </tr> <tr> <td>R3</td> <td>601.50</td> <td>54.01</td> <td>19.74</td> </tr> <tr> <td>R4</td> <td>662.08</td> <td>53.56</td> <td>26.06</td> </tr> </tbody> </table>	Sessione Riabilitativa	SCI	AEREO	TASTIERA	R2	150.69	54.38	41.97	R3	601.50	54.01	19.74	R4	662.08	53.56	26.06	<ul style="list-style-type: none"> <li>3 sessioni riabilitative eseguite (tutti gli exergames)</li> <li>sessioni completate: SCI (0/3), AEREO (3/3), TASTIERA* (3/3)</li> </ul> <p>*Sessioni TASTIERA eseguite con braccio DX</p> <p><b>Risultato:</b> Pur non avendo mai completato lo SCI, il tempo di esecuzione è aumentato con il progredire delle sessioni riabilitative (maggiore capacità di eseguire l'esercizio) e sono diminuite le pause di gioco.</p>																				
Sessione Riabilitativa	SCI	AEREO	TASTIERA																																			
R2	150.69	54.38	41.97																																			
R3	601.50	54.01	19.74																																			
R4	662.08	53.56	26.06																																			

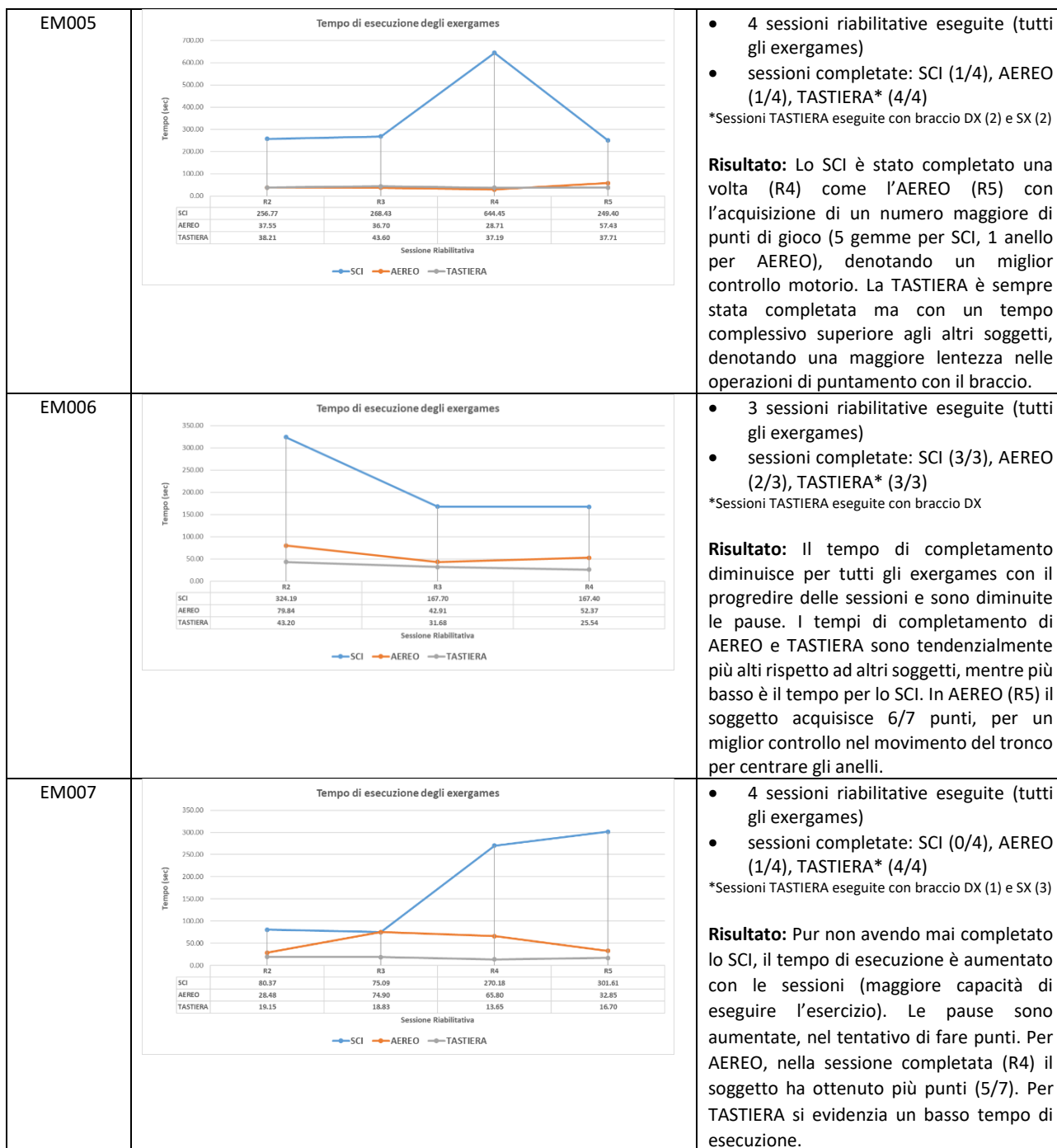


FIGURA 42 - GRAFICI RELATIVI AL TEMPO DI ESECUZIONE DI CIASCUN EXERGAMES PER OGNI PAZIENTE

In figura sono presentati i grafici relativi al tempo di esecuzione di ciascuno degli exergames per ciascuna delle sessioni riabilitative esaminate. Il numero di sessioni riabilitative eseguite dai soggetti non è sempre lo stesso, in quanto alcuni soggetti hanno effettuato più o meno sessioni di altri. Ciò è dipeso sia da aspetti logistici di gestione del paziente in ambito ospedaliero sia dalle condizioni del paziente. Oltre al tempo di esecuzione sono presenti anche informazioni sul completamento delle sessioni riabilitative, per cui è importante evidenziare che per alcuni soggetti, essere riusciti a completare una sessione riabilitativa o anche uno solo degli exergames rappresenta un risultato positivo sul breve periodo.

In generale si notano valori variabili nell'analisi della sessione riabilitativa con gli exergames, in cui alcuni pazienti aumentano i carichi di lavoro giorno dopo giorno e altri che tendono a ridurlo. Ciò



risulta consono all'obiettivo degli exergames, che è quello di stimolare il paziente a livello neuromotorio e cognitivo. Pertanto, l'adattamento del carico di lavoro è fondamentale per ottenere continuità e mantenere nel tempo gli stimoli riabilitativi. Esso è risultato essere un elemento molto importante per i pazienti, soprattutto per chi ha necessità di ridurlo. Risulta perciò fondamentale avere parametri di gioco che permettano una maggiore personalizzazione dell'esperienza di gioco, in modo da andare incontro alle esigenze dei pazienti con maggiori difficoltà.

## Risultati sperimentazione pazienti Parkinson

In questa sezione, verranno riportati i risultati relativi alle sperimentazioni pilota eseguite su soggetti con malattia di Parkinson. Le sperimentazioni sono state eseguite in ambito ospedaliero presso l'Ospedale San Giuseppe di Piancavallo, struttura dell'Istituto Auxologico Italiano, Divisione di Neurologia e Neuroriabilitazione, in uno scenario supervisionato da personale sanitario.

L'obiettivo di questa sperimentazione è stato quello di valutare l'usabilità del sistema e di ottenere alcuni risultati preliminari sugli effetti degli esercizi sulle capacità motorie dei pazienti. Il gruppo di soggetti coinvolto è stato di 15 soggetti con malattia di Parkinson con età media di  $71.4 \pm 7.2$  anni. Tutti i soggetti partecipanti sono stati in grado di eseguire gli exergames previsti dal protocollo sperimentale senza aiuto esterno.

I partecipanti hanno eseguito la sequenza dei tre exergames (Sci di fondo, Aeroplano e Tastiera) come previsto dal protocollo sperimentale. In questa fase, per tutti gli exergames e per tutti i soggetti è stato configurato un basso livello di difficoltà. Ogni partecipante ha eseguito due sessioni: la prima sessione è stata utilizzata per istruire il paziente nei movimenti richiesti e per familiarizzare con gli exergames; la seconda sessione per raccogliere dati relativi alle prestazioni motorie. Al termine delle sessioni è stato presentato ad ogni soggetto il questionario standard System Usability Scale (SUS).

I questionari SUS somministrati hanno restituito un punteggio complessivo di 69 ( $\pm 22.1$  punti), un valore sufficiente e poco al di sopra della media di 68, che rappresenta il punteggio minimo per considerare un sistema facilmente usabile.

	<b>1 – Non d'accordo</b>	<b>2 – Poco d'accordo</b>	<b>3 – Neutrale</b>	<b>4 – Abbastanza d'accordo</b>	<b>5 – Molto d'accordo</b>
<i>1. Penso che mi piacerebbe utilizzare questo sistema frequentemente</i>	10%	10%	10%	40%	30%
<i>2. Ho trovato il sistema complesso senza che ce ne fosse bisogno</i>	60%	20%	10%	0%	10%
<i>3. Ho trovato il sistema molto semplice da usare</i>	10%	0%	40%	20%	30%
<i>4. Penso che avrei bisogno del supporto di una persona già in grado di utilizzare il sistema</i>	10%	20%	40%	20%	10%
<i>5. Ho trovato le varie funzionalità del sistema bene integrate</i>	0%	10%	20%	50%	20%
<i>6. Ho trovato incoerenze tra le varie funzionalità del sistema</i>	90%	10%	0%	0%	0%
<i>7. Penso che la maggior parte delle persone potrebbero imparare ad utilizzare il sistema facilmente</i>	0%	30%	10%	50%	10%
<i>8. Ho trovato il sistema molto macchinoso da utilizzare</i>	60%	0%	20%	10%	10%

<i>9. Ho avuto molta confidenza con il sistema durante l'uso</i>	10%	10%	20%	40%	20%
<i>10. Ho avuto bisogno di imparare molti processi prima di riuscire ad utilizzare al meglio il sistema</i>	30%	30%	10%	30%	0%

Nel dettaglio, il 70% dei partecipanti ha indicato che gli piacerebbe usare gli exergames frequentemente (domanda 1), mentre il 20% ha risposto negativamente a questa domanda. Solo il 10% del campione trova gli exergames inutilmente complessi (domanda 2) e non facili da usare (domanda 3), mentre quasi il 90% rimanente ha espresso un parere positivo sulla complessità delle applicazioni e il 50% le considera di facile utilizzo.

Tuttavia, alcuni punti critici sono emersi dalla domanda 4, poiché solo il 30% dei partecipanti ha dichiarato di non avere necessità di supporto di una persona esperta per l'utilizzo del sistema, mentre un altro 30% sarebbe d'accordo nel riceverlo. Il restante 40% ha risposto in modo neutro al quesito. Per quanto riguarda l'integrazione delle varie funzionalità nelle applicazioni (domanda 5) e la consistenza delle stesse (domanda 6), rispettivamente il 70% e il 100% dei partecipanti al questionario hanno risposto molto positivamente. Il 60% del campione reputa che la maggior parte delle persone imparerebbe ad usare il sistema molto velocemente (domanda 7), mentre il 30% no.

Un altro problema riscontrato è relativo al fatto che il 60% dei partecipanti trova gli exergames molto intricati da usare (domanda 8), sebbene il 60% si sente molto a suo agio nell'utilizzarli (domanda 9). Questa discrepanza trova una spiegazione con le risposte all'ultimo quesito (domanda 10), che mostra come il 60% dei partecipanti necessita di imparare molte cose prima poter usufruire degli exergames.

Quindi, dopo alcune difficoltà iniziali, gli utenti riescono ad imparare ad utilizzare il sistema senza ulteriori problemi. Va sottolineato che per tutti i partecipanti è stato solo il secondo utilizzo degli exergames e che, come detto in precedenza, i questionari facevano riferimento all'insieme degli exergames e non ai singoli.

## Conclusione

Nell'ampio panorama della riabilitazione motoria, l'integrazione della realtà virtuale (VR) ha aperto nuovi orizzonti, introducendo approcci innovativi e coinvolgenti. L'impiego di exergames, applicazioni ludiche in realtà virtuale, rappresenta una promettente frontiera per migliorare l'efficacia delle terapie motorie, specialmente per pazienti affetti da patologie come la Malattia di Parkinson e il Post-Ictus. In questo contesto, la presente tesi si colloca all'incrocio tra tecnologia e riabilitazione, avendo come obiettivo lo sviluppo di tre exergames basati sulla realtà virtuale. Sfruttando l'algoritmo di tracciamento del corpo offerto dalla Azure Kinect, questi exergames combinano aspetti terapeutici con un'esperienza ludica. Tale approccio ambisce non solo a offrire un percorso terapeutico efficace, ma anche a rendere più piacevole e stimolante l'iter riabilitativo per i pazienti.

Ciascuno dei tre exergames sviluppati, ovvero Sci di fondo, Aereo e Tastiera, è caratterizzato da movimenti specifici per l'utilizzo. Questi movimenti corrispondono ad esercizi terapeutici appositamente pensati per pazienti affetti da Parkinson e postumi di Ictus, e sono stati indicati dai terapeuti partecipanti al progetto regionale al quale questa tesi fa riferimento.

Lo sviluppo degli exergames rappresenta una risposta alle esigenze specifiche sia dei pazienti sia dei terapeuti, offrendo anche un'alternativa domiciliare per le sessioni di riabilitazione. Questo approccio non solo mira a diminuire il tempo trascorso in ospedale, alleviando lo stress dei pazienti, ma anche a ottimizzare le risorse sempre più limitate nel settore sanitario. Ciò consente una maggiore efficienza nelle terapie e contribuisce a migliorare l'assistenza complessiva. In aggiunta, la raccolta sistematica dei dati di utilizzo e dei movimenti effettuati dagli utenti durante le sessioni di gioco rappresenta un elemento distintivo degli exergames. Questi dati, accessibili anche in remoto, forniscono un'importante fonte di informazioni per la valutazione dello stato di salute dei pazienti e per valutare le loro performance. La possibilità di monitorare tali dati consente ai terapeuti di personalizzare le terapie in modo più accurato, facilitando un intervento tempestivo e mirato.

I risultati ottenuti dalle sperimentazioni, in cui sono stati somministrati i questionari SUS e NASA-TLX ai partecipanti alle sessioni di test, mostrano un buon livello d'uso e un carico di lavoro percepito non elevato per tutte e tre gli exergames, evidenziando l'efficacia del lavoro svolto. Gli exergames Tastiera e Aereo hanno ottenuto risultati migliori sia per l'usabilità sia per il carico di lavoro percepito. L'exergame Sci di fondo è stato invece l'unico a riscontrare alcune criticità, che potrebbero corrispondere ad un punto di partenza per possibili sviluppi futuri.

Inoltre, le sperimentazioni ospedaliere effettuate sugli exergames hanno offerto preziose informazioni per attestarne l'efficacia in un contesto strettamente terapeutico. I risultati ottenuti hanno confermato un elevato livello di usabilità delle applicazioni. Tuttavia, sono emerse alcune criticità che rimarcano la necessità di ulteriori test diretti con terapeuti e pazienti.

Nonostante i risultati positivi, in questa tesi non è stato possibile effettuare sessioni di test più approfondite per dimostrare l'efficacia degli exergames nella riabilitazione motoria dei pazienti. Sebbene numerosi studi abbiano evidenziato quanto gli exergames e più in generale la realtà virtuale possano essere uno strumento prezioso per le terapie riabilitative, sono necessarie ulteriori fasi di test, specialmente coinvolgendo pazienti con Parkinson e post-Ictus, per valutare accuratamente l'impatto terapeutico degli exergames sviluppati. I risultati ottenuti evidenziano che una maggiore adattabilità da parte delle applicazioni è necessaria nel caso di utilizzo da parte dei pazienti. In tal modo si riuscirebbe ad offrire una maggiore personalizzazione dell'esperienza e a permettere ad un numero sempre maggiore di pazienti di usufruire delle applicazioni.



Infine, non è stato possibile condurre un'analisi dettagliata sull'usabilità e sullo sforzo percepito specificamente dai pazienti, rappresentanti l'utenza specifica degli exergames. L'indagine sull'usabilità condotta con i pazienti ospedalieri è stata di carattere generale, prendendo in considerazione l'insieme degli exergames e non analizzandoli singolarmente.

Il presente lavoro si propone quindi di contribuire al continuo sviluppo di strumenti terapeutici basati sulla realtà virtuale, sottolineando il ruolo cruciale degli exergames nell'evoluzione della riabilitazione motoria. I risultati ottenuti e le sfide affrontate forniscono spunti preziosi per orientare futuri sviluppi in questa promettente intersezione tra tecnologia e benessere fisico.

## Sviluppi futuri

I test svolti sugli exergames hanno fornito dati rilevanti riguardo all'usabilità e al carico di lavoro percepito. Tuttavia, come accennato in precedenza, un'analisi più approfondita, con un maggior numero di sessioni di prova per ciascun exergames, consentirebbe di confermarne l'efficacia e di comprendere se gli utenti riescono a migliorare le proprie prestazioni nel corso del tempo. Inoltre, ulteriori test potrebbero rivestire un ruolo fondamentale nel perfezionare alcune meccaniche delle applicazioni e nel migliorare l'esperienza di gioco complessiva. Ad esempio, sarebbe da valutare l'impatto che la semplificazione di alcuni livelli di gioco o l'incremento della personalizzazione dell'esperienza potrebbero portare, in modo tale che il gioco si adatti meglio a pazienti con diversi livelli di compromissione degli arti.

Dal punto di vista della tecnologia invece, uno sviluppo potenziale potrebbe coinvolgere la transizione dall'uso della Azure Kinect in favore di tecnologie e dispositivi più accessibili e meno complessi. Infatti, nel caso si ottenessero risultati soddisfacenti attraverso l'uso di tecnologie in grado di tracciare i movimenti corporei mediante una telecamera comune, ciò semplificherebbe l'utilizzo degli exergames nell'ambito domiciliare, apportando significativi vantaggi in termini di facilità d'uso e costi.

Oltre a ciò, i dati sui movimenti effettuati dai pazienti raccolti dagli exergames potrebbero essere ulteriormente sfruttati in futuro attraverso la creazione di sistemi automatizzati per la raccolta e l'analisi di questi dati. Ciò renderebbe il monitoraggio dei pazienti non solo semplice ma anche una pratica di routine. La possibilità di effettuare analisi rapide e dettagliate su tutti i parametri motori catturati dagli exergames potrebbe enormemente potenziare le capacità degli exergames. Inoltre, l'implementazione di funzionalità avanzate per l'analisi dei dati potrebbe aprire nuove opportunità per comprendere meglio l'andamento delle prestazioni e adattare in modo più mirato le terapie in base alle esigenze specifiche di ciascun paziente.

In conclusione, nonostante alcuni limiti e le sfide riscontrate, questo progetto apre nuove prospettive per l'integrazione di exergames nella riabilitazione motoria domiciliare, contribuendo al benessere dei pazienti. Il lavoro svolto fornisce una solida base per futuri sviluppi e miglioramenti nel campo della riabilitazione virtuale.

## Bibliografia

- [1] C. University, «The Cambridge English Dictionary,» [Online]. Available: <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/>. [Consultato il giorno 04 10 2023].
- [2] Keus, «Effectiveness of physiotherapy in Parkinson's disease: the feasibility of a randomised controlled trial,» vol. 13, n. 2, pp. 115-21, 2007 .
- [3] J. M. Veerback, «What is the evidence for physical therapy poststroke? A systematic review and meta-analysis,» vol. 9, n. 2, 2014.
- [4] D. M. d. Costa, 2019.
- [5] G. Riva, «Applications of virtual environments in medicine,» *Methods of Information in Medicine*, vol. 42, n. 5, pp. 524-34, 2003.
- [6] G. M. R. D. L. M. C. S. B. P. M. C. F. F. G. C. C. A. M. R. S. C. Maria Grazia Maggio, «The Growing Use of Virtual Reality in Cognitive Rehabilitation: Fact, Fake or Vision? A Scoping Review,» *Journal of the National Medical Association*, vol. 111, n. 4, pp. 457-463, 2019.
- [7] G. M. S. P. M. I. Gaetano Tieri, «Virtual reality in cognitive and motor rehabilitation: facts, fiction and fallacies,» *Expert Review of Medical*, vol. 15, n. 2, pp. 107-117, 2018.
- [8] R. P. D. K. L. V. G. Reneh Karamians, «Effectiveness of Virtual Reality- and Gaming-Based Interventions for Upper Extremity Rehabilitation Poststroke: A Meta-analysis,» *ARCHIVES OF PHYSICAL MEDICINE AND REHABILITATION*, vol. 101, n. 5, pp. 885-896, 2020 May.
- [9] K. S. F. D. X. L. Y. W. B. Z. L. H. M. J. Cheng Lei, «Effects of virtual reality rehabilitation training on gait and balance in patients with Parkinson's disease: A systematic review,» *PLOS ONE*, vol. 14, n. 11, 2019 Nov.
- [10] C. L. J. L. L. W. J. M. G. L. L. G. X. S. Z. W. Hao Feng, «Virtual Reality Rehabilitation Versus Conventional Physical Therapy for Improving Balance and Gait in Parkinson's Disease Patients: A Randomized Controlled Trial,» *Medical Science Monitor*, vol. 5, n. 25, pp. 4186-4192, 2019 Jun .
- [11] A. Afsoon, S.-S. Taha, S. Zahra e R.-H. Peyman, «Effectiveness of virtual reality-based exercise therapy in rehabilitation: A scoping review».
- [12] D. G. Alana, F. Pascal, T. Veronica e N. Nassir, «Motor Rehabilitation Using Kinect: A Systematic Review,» *Games for Health Journal*, vol. 4, n. 2, pp. 123-35, 2015 Apr.
- [13] A. e. a. Justin Amadeus, «Evaluation of the Pose Tracking Performance of the Azure Kinect and Kinect v2 for Gait Analysis in Comparison with a Gold Standard: A Pilot Study,» *Sensors*, vol. 20, n. 18, p. 5104, 2020.
- [14] M. T. e. al., «Evaluation of the Azure Kinect and Its Comparison to Kinect V1 and Kinect V2,» *Sensors*, vol. 21, n. 2, p. 413, 2021.

- [15] A. e. a. Mauro, «Postural control assessment via Microsoft Azure Kinect DK: An evaluation study,» *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 209, n. 106324, 2021 .
- [16] B. G C, «Virtual rehabilitation--benefits and challenges,» *Methods of information in medicine*, vol. 42, n. 5, pp. 519-23, 2003.
- [17] O. Urra, A. Casals e R. Jane, «The impact of visual feedback on the motor control of the upper-limb,» *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 2015, pp. 3945-8, 2015.
- [18] C. Joyce, W. Z Jane e M. Martin J, «Study of stroke condition and hand dominance using a hidden Markov, multivariate autoregressive (HMM-mAR) network framework,» *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 2008, pp. 189-92, 2008.
- [19] B. e. a. Samih, «Virtual reality feedback cues for improvement of gait in patients with Parkinson's disease,» *Tremor Other Hyperkinet Mov (N Y)*, vol. 1, n. 4, p. 225, 2014 Apr.
- [20] B. S. e. al., «Effects of long-term gait training using visual cues in an individual with Parkinson disease,» *Physical Therapy*, vol. 86, n. 2, pp. 186-94, 2006 Feb.
- [21] G. e. a. N, «An evaluation of the role of internal cues in the pathogenesis of parkinsonian hypokinesia,» *Brain*, vol. 116 , n. 6, pp. 1575-87., 1993 Dec.
- [22] A. Jankovic, «Parkinson's disease: clinical features and diagnosis,» vol. 79, n. 4, pp. 368-76, 2008.
- [23] Rodriguez-Blazquez, «Neuropsychiatric symptoms and caregiver's burden in Parkinson's disease,» *Parkinsonism & Related Disorders*, vol. 21, n. 6, p. 629–634, 2015.
- [24] Linder, «The home stroke rehabilitation and monitoring system trial: a randomized controlled trial,» *Int J Stroke*, vol. 8, n. 1, pp. 46-53, 2013 Jan;.
- [25] Fattore, «Measuring New Public Management and Governance in Political Debate,» *PAR*, vol. 72, n. 2, pp. 218-227, 2012.
- [26] Fluet, 2013.
- [27] Gandolfi, «Virtual Reality Telerehabilitation for Postural Instability in Parkinson's Disease: A Multicenter, Single-Blind, Randomized, Controlled Trial,» *Biomed Res Int.*, 2017.
- [28] Gutierrez, «The Sociopolitical Turn in Mathematics Education,» *Research in Mathematics Education*, vol. 44, n. 1, pp. 37-68 , 2013.
- [29] Lewis, «The active cycle of breathing technique: a systematic review and meta-analysis,» *Respir Med*, vol. 106, n. 2, pp. 155-72, 2012.
- [30] Levin, 2020.
- [31] G. M. G. G. Cimolin V, «Gait Patterns in Prader-Willi and Down syndrome patients. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation,» 2010.

- [32] C. D. N. M. M. Grecco LAC, «). Transcranial direct current stimulation during treadmill training in children with cerebral palsy: A randomized controlled double-blind clinical trial. *Research in Developmental Disabilities*,» 2014.
- [33] F. e. a. Claudia, «A Self-Managed System for Automated Assessment of UPDRS Upper Limb Tasks in Parkinson’s Disease,» *Sensors*, vol. 18, n. 10, p. 3523, 2018.
- [34] D. I. e. al., «A gait analysis data collection and reduction technique,» *Human Movement Science*, vol. 10, n. 5, p. 575–587, 1991.
- [35] A. Capozzo, «Position and orientation in space of bones during movement: anatomical frame definition and determination,» *Clinical Biomechanics*, vol. 10, pp. 171-178, 1995.
- [36] Wikipedia, «Cochrane (organizzazione),» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Cochrane\\_\(organizzazione\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Cochrane_(organizzazione)). [Consultato il giorno 02 10 2023].
- [37] F. e. a. Claudia, «Feasibility of Home-Based Automated Assessment of Postural Instability and Lower Limb Impairments in Parkinson’s Disease,» *Sensors*, vol. 19, n. 5, p. 1129, 2019.