

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica



Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione, sviluppo e valutazione della User
Experience di un exergame per l'analisi e
l'allenamento della destrezza manuale in soggetti
con Malattia di Parkinson**

Relatrice

Prof.ssa Gabriella Olmo

Correlatori

Dott. Gianluca Amprimo

Dott.ssa Claudia Ferraris (CNR)

Candidata

Sofia Tonti

Marzo 2024

Abstract

Il lavoro di tesi si è focalizzato sulla progettazione e sullo sviluppo di un exergame in Unity per la valutazione e la riabilitazione della mano in soggetti affetti da Malattia di Parkinson, e specificatamente nella valutazione della sua usabilità. In una prima fase, il lavoro si è concentrato sullo sviluppo del gioco, secondo le linee guida individuate in letteratura. L'exergame, definito *FARM Exergame*, si basa su un'interazione tramite *hand gesture*, utilizzando un sistema di tracciamento della mano *markerless* basato su una combinazione di telecamera RGB e *Deep Learning*. La gestualità della mano richiesta all'utente in fase di gioco è fondamentale nella valutazione e riabilitazione in pazienti affetti dalla Malattia di Parkinson e consiste in: presa palmare, presa digitale e rotazione della mano. L'exergame prevede una fase di calibrazione iniziale delle gesture, che consente di effettuare una valutazione personalizzata del range di movimento dell'utente. Segue poi una fase di allenamento, dedicata all'apprendimento delle interazioni fondamentali, ed infine una fase di gioco, in cui vengono valutate le performance dell'utente. La sperimentazione effettuata a conclusione della fase di sviluppo è stata finalizzata alla valutazione dell'usabilità dell'exergame in due popolazioni di riferimento: una popolazione sana ed una popolazione parkinsoniana. Ai partecipanti è stato richiesto di compilare alcuni questionari per valutare lo stato cognitivo, la percezione soggettiva del carico di lavoro associato allo svolgimento dell'exergame, l'esperienza complessiva dell'utente e l'usabilità dell'exergame.

I pazienti parkinsoniani hanno riportato una percezione più elevata del carico di lavoro durante l'attività, in particolare per quanto riguarda lo sforzo mentale e l'impegno richiesto. Dall'analisi dei dati raccolti, emerge che entrambi i gruppi di studio hanno valutato positivamente l'usabilità dell'exergame (con punteggio nel questionario *System Usability Scale* pari a 78 per entrambe le popolazioni). I risultati complessivi suggeriscono che l'exergame sia ampiamente accettato e potenzialmente utile per la riabilitazione della mano nei pazienti affetti dalla Malattia di Parkinson.

Indice dei contenuti

Indice dei contenuti	I
Elenco delle tabelle	III
Elenco delle figure	IV
Acronimi	VI
1 Introduzione	1
1.1 Malattia di Parkinson	2
1.2 Riabilitazione della mano	3
2 Stato dell'arte	6
2.1 Exergame	6
2.1.1 Controller e dispositivi utilizzati	11
2.1.2 Utilità e criticità degli exergame attuali nel Parkinson	13
2.2 User Experience e Usability degli exergame in letteratura	14
3 Materiali e metodi	16
3.1 Progettazione FARM Exergame	16
3.1.1 Fase di Calibrazione	17
3.1.2 Fase di Allenamento	18
3.1.3 Fase di Gioco	19
3.2 Sviluppo Exergame	20
3.2.1 Gestione telecamera	20
3.2.2 Hand Tracking	20
3.2.3 Comunicazione Client/Server	21
3.2.4 Sistemi di riferimento Hand Tracking e Unity	22
3.2.5 Introduzione della componente di profondità	24
3.2.6 Calibrazione	26
3.2.7 Exergame	32
3.2.8 Training	43

4	Protocollo sperimentale	46
4.1	Valutazione Usabilità e UX	46
4.2	Descrizione del protocollo sperimentale	49
4.3	Questionari	50
5	Risultati della sperimentazione	52
5.1	Risultati e discussione	52
6	Conclusioni	78
6.1	Conclusioni	78
6.2	Sviluppi futuri	80
	Bibliografia	83
	83

Elenco delle tabelle

5.1	Tabella relativa al punteggio medio ottenuto (\pm deviazione standard) al questionario CFQ.	54
5.2	Risultati <i>NASA Task Load Index</i> (NASA TLX) della prima prova condotta su entrambe le popolazioni.	55
5.3	Risultati NASA TLX della seconda prova condotta su entrambe le popolazioni.	57
5.4	Principali problemi tecnici riscontrati dai partecipanti - UX1.	62
5.5	Principali problemi dovuti a fattori esterni riscontrati dai partecipanti - UX1.	63
5.6	Valutazione dei Task più facili e più difficili - UX1.	63
5.7	Principali problemi tecnici riscontrati dai partecipanti - UX2.	67
5.8	Principali problemi dovuti a fattori esterni riscontrati dai partecipanti - UX2.	68
5.9	Valutazione dei Task più facili e più difficili - UX2.	68
5.10	Tempi medi impiegati per ogni task.	71
5.11	Valutazione degli errori commessi nei vari task per entrambi i gruppi di studio nella seconda prova.	72

Elenco delle figure

2.1	Schema per la definizione di un exergame ed un exergame con scopi terapeutici [29].	8
3.1	Landmark della mano.	21
3.2	Visualizzazione della fase di calibrazione.	27
3.3	Fase di calibrazione della gesture: intra-extra rotazione della mano.	28
3.4	Visualizzazione del menù principale nella scena <i>mainMenu</i>	29
3.5	Grafico relativo alla soglia individuata per la presa palmare.	30
3.6	Grafico relativo alla soglia individuata per la presa digitale.	30
3.7	Grafico relativo alle soglie individuate per l'intra-extra rotazione della mano.	31
3.8	Visualizzazione iniziale della lista di prodotti richiesti nella scena <i>Exergame</i>	33
3.9	Visuale della Main Camera in Unity per il Task 1 (movimento richiesto: presa palmare).	34
3.10	Visuale della Main Camera in Unity per il Task 2 (movimento richiesto: intra-extra rotazione della mano in dorsi-flessione).	35
3.11	Visuale della Main Camera in Unity per il Task 3 (movimento richiesto: presa digitale).	36
3.12	Visuale della Main Camera in Unity per il Task 4 (movimento richiesto: presa digitale prolungata).	37
3.13	Visualizzazione dell' <i>halo</i> nel Task 1.	39
3.14	Visualizzazione dell' <i>halo</i> nel Task 2.	39
3.15	Feedback visivo relativo alla condizione di errore nel Task 4.	40
3.16	Performance riassuntive del loop di gioco.	42
3.17	Gesture richieste nella fase di Training dell'exergame.	43
3.18	Fase di Training relativa alla presa digitale.	44
3.19	Fase di Training relativa alla presa digitale prolungata.	44
3.20	Esempio di applicazione dell' <i>halo</i> nella fase di Training.	45
4.1	Disposizione dei popup informativi.	47

4.2	Visualizzazione tecnica dell' <i>halo</i> per evidenziare un oggetto correttamente toccato.	48
5.1	Genere dei partecipanti del gruppo di controllo.	52
5.2	Genere dei partecipanti del gruppo dei parkinsoniani.	52
5.3	Livello di scolarizzazione del gruppo dei parkinsoniani.	53
5.4	Livello conoscenza della tecnologia e ambienti di gioco virtuali.	59
5.5	Valutazione complessiva dell'exergame - UX1.	59
5.6	Valutazione dei feedback e delle istruzioni di gioco - UX1.	60
5.7	Valutazione della fase di allenamento - UX1.	61
5.8	Autovalutazione svolgimento secondo loop di gioco (ordine 2) - UX1.	62
5.9	Gradimento complessivo dell'exergame - UX1.	65
5.10	Gradimento dell'ambientazione di gioco: fattoria - UX1.	65
5.11	Valutazione complessiva dell'exergame e dei feedback inseriti - UX2.	66
5.12	Valutazione dell'utilità della fase di allenamento e autovalutazione delle performance nella seconda prova e nel secondo ordine - UX2.	67
5.13	Gradimento complessivo dell'exergame - UX2.	69
5.14	Presa palmare rispettivamente di un soggetto sano e di un soggetto parkinsoniano.	74
5.15	Intra-extra rotazione mano rispettivamente di un soggetto sano e di un soggetto parkinsoniano.	75
5.16	Presa digitale rispettivamente di un soggetto sano e di un soggetto parkinsoniano.	76

Acronimi

PD *Parkinson's Disease*

MDS-UPDRS *Movement Disorder Society-Unified Parkinson's Disease Rating Scale*

ADL *activities of daily living*

SG *Serious Game*

SDT *Self-Determination Theory*

VE *virtual exercise*

LMC *Leap Motion Controller*

RGB-D *RGB-Depth*

HMI *Human-Machine Interface*

DL *Deep Learning*

OpenCV *Open Source Computer Vision*

UX *User Experience*

UDP *User Datagram Protocol*

TCP *Transmission Control Protocol*

CFQ *Cognitive Failures Questionnaire*

NASA TLX *NASA Task Load Index*

UX1 *User Experience v1*

UX2 *User Experience v2*

SUS *System Usability Scale*

MMSE *Mini-Mental State Examination*

Capitolo 1

Introduzione

Il lavoro di tesi proposto si focalizza sulla tecnologia degli exergame con l'obiettivo di valutarne il possibile impiego come strumento di supporto alla riabilitazione e/o al monitoraggio dei pazienti affetti dalla Malattia di Parkinson. In particolare, è stato sviluppato un exergame dedicato all'allenamento e alla riabilitazione della mano, in quanto uno dei sintomi caratteristici di questa patologia è associato ai disturbi motori. Ci si è concentrati sulla motricità fine, poichè la Malattia di Parkinson determina una graduale diminuzione della capacità di eseguire movimenti fini e precisi, tipici delle azioni della mano.

La valutazione e la riabilitazione delle disfunzioni associate al movimento della mano sono fondamentali per migliorare la qualità della vita dei pazienti affetti dalla Malattia di Parkinson. Il protocollo *Movement Disorder Society-Unified Parkinson's Disease Rating Scale* (MDS-UPDRS) fornisce uno strumento clinico e standardizzato, attraverso il quale è possibile stabilire ed individuare la condizione complessiva del paziente e nello specifico il grado di *impairment* motorio. Nel contesto della riabilitazione motoria, la tecnologia degli exergame offre un approccio innovativo, consentendo il coinvolgimento attivo del paziente, anche sul piano cognitivo. Infatti, la stimolazione cognitiva prodotta da un contesto *gamified* può comportare, ad esempio, un rallentamento dell'avanzare di comorbidità cognitive (come la demenza) [17], un miglioramento nella memoria e nella coordinazione dei movimenti.

L'exergame è stato progettato tenendo in considerazione le specifiche esigenze dei pazienti affetti da questa patologia, in particolare focalizzandosi sulla capacità motoria della mano. Nello specifico, l'interazione con il gioco sviluppato avviene attraverso la mano dell'utente, il cui tracking in real-time è possibile mediante l'utilizzo di una telecamera dedicata e di un software di tracciamento della mano basato su deep learning. I movimenti richiesti durante la sessione dell'exergame riflettono le principali gestualità impiegate nella fisioterapia e riabilitazione tradizionale.

Per la progettazione dell'exergame sono stati considerati i canoni descritti in letteratura, in modo da rendere l'exergame il più possibile conforme alle regole di

usabilità già utilizzate e sperimentate. La valutazione dell'usabilità rappresenta il passo iniziale per comprendere l'efficacia e l'accettazione di questo nuovo strumento nella pratica clinica.

E' stata condotta una sperimentazione al fine di valutare la *User Experience* (UX) dell'utente finale e l'*Usability* dell'exergame.

I partecipanti della sperimentazione sono stati sottoposti ad alcuni questionari per valutare la presenza di eventuali problemi cognitivi, la percezione soggettiva del carico di lavoro associato allo svolgimento dell'exergame, l'esperienza complessiva dell'utente e l'usabilità dell'exergame.

Implicazioni future includono la potenziale integrazione di questa tecnologia nell'ambito della terapia riabilitativa standard per la Malattia di Parkinson, con l'obiettivo di migliorare la qualità di vita e la funzionalità della mano nei pazienti affetti dalla malattia. Ulteriori impieghi futuri prevedono la possibilità di introdurre questo strumento per scopi valutativi della patologia e, dunque, con finalità di monitoraggio.

1.1 Malattia di Parkinson

La Malattia di Parkinson, *Parkinson's Disease* (PD), è una malattia neurodegenerativa, caratterizzata da una progressiva degenerazione dei neuroni dopaminergici nella substantia nigra, situata nella parte centrale del mesencefalo [17]. L'area del cervello indicata è responsabile della produzione di dopamina, un neurotrasmettitore coinvolto nel controllo del movimento e nella regolazione dell'umore.

La Malattia di Parkinson è tra le patologie più comuni che colpiscono il sistema nervoso centrale. Nella popolazione mondiale si stima che 1-2 persone su 1000 siano affette da questa malattia [9].

I sintomi motori più comuni, legati alla diminuzione dei livelli di dopamina nel cervello, sono [14][17]:

- rigidità muscolare, che si manifesta come resistenza al movimento, indipendente dalla velocità o dalla modalità di allungamento;
- diminuzione della potenza muscolare, che si traduce con una lentezza nei movimenti (bradicinesia), una riduzione dell'ampiezza dei movimenti e l'incapacità di adattarsi rapidamente ai cambi di direzione del movimento nell'ambiente circostante e, dunque, determina una diminuzione della coordinazione;
- instabilità posturale;
- tremore, tipicamente di tipo ritmico, regolare e di bassa frequenza, associato agli arti inferiori e superiori e si verifica principalmente a riposo, con una tendenza a diminuire nell'effettuare un movimento volontario [13].

Tuttavia, la Malattia di Parkinson comporta anche una sintomatologia legata alla sfera cognitiva, come stati d'ansia e depressione, disfunzioni cognitive e disturbi del sonno, che possono impattare significativamente sulla vita dei pazienti [17][23]. Attualmente non è stata individuata una cura per la Malattia di Parkinson, ma ci si concentra sulla terapia farmacologica sintomatica.

I farmaci dopaminergici agonisti, anticolinergici e la *LEVODOPA* sono i farmaci maggiormente utilizzati per compensare il deficit di dopamina.

Nella Malattia di Parkinson si interviene sui sintomi motori e sulla prevenzione terziaria finalizzata al rallentamento della progressione della malattia [14], tramite terapia farmacologica e riabilitazione motoria.

Determinati sintomi motori, quali la difficoltà nel compiere movimenti fini delle dita delle mani e la difficoltà nell'esecuzione di movimenti ripetitivi e sequenziali, rispondono scarsamente alla terapia farmacologica [3].

Studi in letteratura hanno dimostrato che valutare l'abilità motoria della mano consenta di monitorare la progressione della malattia nel tempo [10]. La tecnologia degli exergame costituisce uno strumento di supporto ai protocolli tradizionali di follow-up e valutazione della malattia, permettendo il monitoraggio del paziente anche in contesti meno supervisionati, come l'ambiente domestico, ottimizzando i costi, le risorse e l'accesso alle strutture ospedaliere [4].

Ulteriori studi sottolineano l'efficacia della riabilitazione motoria della mano [14], i cui risultati rivestono un ruolo cruciale nel miglioramento della qualità di vita [15] e nelle attività di vita quotidiana per i pazienti affetti da questa patologia.

1.2 Riabilitazione della mano

La riabilitazione motoria tradizionale della mano è dedicata al miglioramento della mobilità fine nei pazienti affetti dalla Malattia di Parkinson [21].

Le evidenze scientifiche [9] dimostrano l'efficacia del trattamento riabilitativo.

In particolare, sono state condotte varie analisi dalle quali è emerso che l'esercizio fisico, inclusi l'allenamento del movimento della mano, esercizi di stretching e la danza, possano portare ad un miglioramento del tremore nelle persone affette dalla PD [13] con l'obiettivo di migliorare la qualità della vita dei pazienti nelle *activities of daily living* (ADL) [10].

Ulteriori analisi in letteratura [11], effettuate su un gruppo di pazienti per cui è previsto un programma di attività fisica (basato su attività della vita quotidiana) (A) e un gruppo di pazienti di controllo (B), per cui è previsto un programma di stretching e rilassamento, hanno dimostrato un significativo miglioramento delle performance ed una maggiore diminuzione dello stato d'ansia nel gruppo A rispetto al gruppo di controllo.

Inoltre, la riabilitazione può essere utilizzata anche come strumento di valutazione della funzionalità della mano e, dunque, per monitorare la progressione della

malattia [9].

Per valutare e quantificare i sintomi e l'avanzamento della Malattia di Parkinson si utilizzano protocolli di riferimento come il MDS-UPDRS [2], strumento utilizzato per analizzare l'impatto della malattia sulla funzionalità motoria, cognitiva ed emotiva dei pazienti [33]. La scala MDS-UPDRS mira a standardizzare i dati raccolti e valutare gli effetti della malattia sulla vita dei pazienti. Il protocollo è composto da quattro sezioni, volte ad analizzare i seguenti aspetti:

- Parte I: valutazione non motoria, incentrata sui sintomi non motori, lo stato cognitivo e mentale del paziente;
- Parte II: valutazione motoria delle attività quotidiane, che include la capacità di svolgere compiti quotidiani, inclusa l'abilità di scrivere o svolgere attività di cura di sé;
- Parte III: valutazione motoria, che si focalizza sulla gravità dei sintomi motori come tremore, rigidità e bradicinesia.
- Parte IV: valutazione delle complicanze terapeutiche, che esamina gli effetti collaterali dei farmaci utilizzati nel trattamento del Parkinson.

Questo protocollo fornisce un quadro dettagliato e completo per valutare e monitorare lo stato di salute complessivo dei pazienti affetti da PD.

Dalla sintomatologia e dagli studi dei disturbi dei pazienti affetti dalla Malattia di Parkinson, emergono la difficoltà di coordinazione, la lentezza e l'instabilità motoria durante l'esecuzione di movimenti specifici.

In una sperimentazione condotta per valutare la configurazione del braccio rispetto alla mano durante l'esercizio, è stato analizzato come i pazienti affetti da Malattia di Parkinson assumano differenti posizioni nella disposizione e nella coordinazione delle parti superiori del corpo durante l'esecuzione di attività specifiche, mostrando una minore stabilità nei movimenti rispetto al gruppo di controllo [21]. Questo è dovuto alla minore capacità di mantenere una traiettoria regolare e controllata durante l'esecuzione di attività motorie, come ad esempio il disegno, ed al rallentamento durante l'esecuzione di tali azioni.

Questi risultati indicano che la Malattia di Parkinson influenza la coerenza e la ripetibilità dei movimenti, determinando una maggiore variabilità nei risultati della riabilitazione. Dunque, il trattamento riabilitativo deve incentrarsi sull'allenamento della mobilità fine delle articolazioni coinvolte nello svolgimento di attività di vita quotidiana. A supporto di questa tesi, è stato condotto un ulteriore studio che ha associato la destrezza manuale allo svolgimento di attività fisiche nella vita quotidiana dei pazienti [10]. Questo studio afferma che la destrezza manuale mostra un progressivo peggioramento nelle fasi lievi e moderate della Malattia di Parkinson, spesso manifestandosi come una bradicinesia progressiva degli arti, prima dello sviluppo della rigidità. Inoltre, i pazienti con PD tendono ad utilizzare maggiormente

il lato del corpo meno colpito dalla malattia.

Queste evidenze sottolineano l'importanza di considerare la destrezza manuale come un elemento fondamentale nella progettazione di interventi riabilitativi mirati, allo scopo di migliorare la qualità di vita e l'autonomia dei pazienti nella gestione delle attività quotidiane. E' emersa dalla letteratura, inoltre, l'importanza nei programmi di riabilitazione di definire l'intensità degli esercizi per migliorare la funzione motoria nei pazienti [12].

Le principali tipologie di movimenti richiesti nella riabilitazione dei disturbi motori della popolazione di soggetti parkinsoniani sono:

- apertura-chiusura mano o presa palmare (*hand grasping*);
- presa digitale (*finger tapping*);
- prono-supinazione mano;
- flessione-estensione mano;

e richiedono una destrezza fine e la capacità di coordinare i movimenti delle dita in modo preciso e controllato. Di seguito, sono riportati alcuni studi in letteratura incentrati sullo svolgimento di queste gestualità della mano.

L'obiettivo di una sperimentazione condotta su 60 partecipanti parkinsoniani [24] è effettuare una valutazione dei risultati ottenuti dallo svolgimento di specifici esercizi per la mano, in termini di destrezza manuale, forza di presa e pizzicamento nelle persone affette da PD. Questi movimenti possono essere associati alla presa palmare, digitale e, più in generale, ad una valutazione dell'abilità motoria. E' emerso che gli esercizi mirati per la mano possano migliorare la destrezza manuale e, dunque, incrementare le abilità motorie in questa popolazione di persone, come dimostrato dai significativi miglioramenti dei valori monitorati sul gruppo sperimentale.

Ulteriori studi effettuati [32] [15] mostrano come l'introduzione di un programma di allenamento specifico per la mano, con esercizi mirati che rispecchiano le attività di vita quotidiana, possa determinare effetti positivi dal punto di vista motorio e cognitivo, sottolineando l'importanza dell'esercizio fisico come intervento non farmacologico per migliorare i sintomi e gli esiti funzionali nei pazienti affetti da PD [23]. Le valutazioni delle funzioni motorie e cognitive sono state eseguite utilizzando il protocollo MDS-UPDRS.

In generale, dalla letteratura scientifica si evince la necessità di ulteriori ricerche e studi approfonditi per individuare e massimizzare i benefici della riabilitazione nei pazienti affetti da Malattia di Parkinson. Un interessante approccio alla riabilitazione è rappresentato dalla tecnologia degli exergame, su cui questa tesi si è focalizzata, esaminati nel Capitolo 2.1.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Exergame

Il termine “exergame” deriva dalla combinazione delle parole *exercise* (esercizio) e *game* (gioco). Gli exergame sono dei videogiochi volti a promuovere l'esercizio fisico dell'utente e rientrano nella categoria dei *Serious Game* (SG), progettati con un obiettivo principale che va oltre il mero intrattenimento, favorendo l'apprendimento dell'utente e/o per migliorare il proprio stato di salute. I SG integrano elementi di gioco con finalità educative, rendendo l'esperienza dell'utente più coinvolgente e motivante [9].

Sono state considerate diverse teorie nella ricerca effettuata sull'exergaming. La review [22] ha evidenziato l'uso della Teoria dell'Autodeterminazione, *Self-Determination Theory* (SDT), come teoria frequentemente impiegata negli exergame: la SDT enfatizza infatti la motivazione intrinseca, ovvero sottolinea la propensione umana all'autodeterminazione, all'autonomia come risultato della volontà soggettiva dell'individuo. E' fondamentale porre l'attenzione sull'ambiente in cui si svolge un'azione, in quanto può incrementare la consapevolezza dell'individuo, con conseguente aumento della motivazione intrinseca. La partecipazione attiva in un exergame riflette una maggiore soddisfazione complessiva di sé e più in generale una propensione dell'individuo al miglioramento [22].

Un'ulteriore teoria a supporto dei benefici degli exergame è la *Flow Theory*, secondo la quale, durante una sessione di gioco, i partecipanti agli exergame vengono trasportati dal flusso di gioco, dimenticandosi delle iniziali motivazioni per cui stanno giocando. La persistenza a giocare è correlata al livello di soddisfazione dei partecipanti ed alla loro volontà di impegnarsi in attività fisiche con mezzi innovativi [22].

I giocatori prestano attenzione a due principali obiettivi durante il gioco:

- *promotion focus*, che determina la tendenza al completamento del gioco con successo;
- *prevention focus*, volto a ridurre le perdite, gli errori, durante il gioco.

I feedback positivi sono da incentivare, a differenza dei feedback negativi legati alle penalità del gioco, soprattutto nel contesto della riabilitazione di persone con patologie, quali il Parkinson.

Inoltre, si può effettuare una valutazione dell'exergame e delle performance dell'utente anche in funzione della specifica terapia farmacologica somministrata.

Alcuni exergame sono stati valutati per essere utilizzati da remoto, offrendo diversi vantaggi, tra cui la riduzione dei costi di riabilitazione e una maggiore accessibilità al servizio [29][6].

E' emerso che gli exergame attuali pongano maggiormente l'accento sul raggiungimento del *primary goal*, che rappresenta l'azione e l'obiettivo di gioco, piuttosto che concentrarsi sul *secondary goal*, ossia su come l'esercizio debba essere eseguito. Il *secondary goal* assume un ruolo centrale nel contesto della riabilitazione e nello specifico nella riabilitazione della mano, oltre ad essere fondamentale per valutare la sicurezza ed i rischi associati all'esecuzione di movimenti errati. Per questo motivo, negli exergame terapeutici da remoto è richiesta la presenza di un supervisore, che possa garantire il corretto svolgimento degli esercizi e la sicurezza del paziente.

Per la progettazione di un exergame con scopi terapeutici, è necessario definire un serie di elementi principali, che ne determinano il corretto sviluppo [29]:

- Definizione dell'exergame terapeutico: l'esercizio non deve soltanto fornire la struttura del gioco, ma determina anche i movimenti fisici consentiti e la loro intensità. Le meccaniche di gioco non possono alterare tali movimenti, in quanto condizionati dalle esigenze dell'esercizio.

Negli exergame terapeutici, gli obiettivi principali si integrano agevolmente nel *gameplay*, mentre quelli secondari, come la precisione del movimento o la prevenzione di compensazioni, possono essere gestiti separatamente, restituendo un feedback all'utente. In Figura 2.1 sono illustrate le principali differenze tra un exergame tradizionale ed un exergame con scopi terapeutici [29].

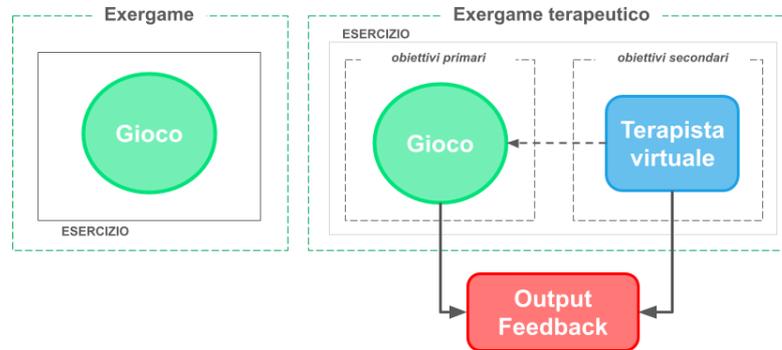


Figura 2.1. Schema per la definizione di un exergame ed un exergame con scopi terapeutici [29].

- Virtualizzazione: si procede implementando gli obiettivi primari dell'esercizio in un esercizio virtuale, *virtual exercise* (VE), definendo i requisiti di input (tracking della mano ed interazione di gioco) e output (feedback) attraverso elementi grafici;
- Game Design: il VE viene trasformato in un exergame, mediante l'introduzione degli elementi di gioco.
- Obiettivi secondari: la progettazione della modalità in cui vengono eseguiti i movimenti richiesti avviene separatamente rispetto alla definizione delle regole di gioco, consentendo di focalizzarsi sullo scopo terapeutico dell'exergame. E' fondamentale analizzare in tempo reale i dati del tracking dei movimenti, al fine di identificare quelli errati e fornire un feedback immediato ai pazienti.

La gestione degli obiettivi secondari, dunque, è progettata in modo da consentire la riutilizzabilità degli exergame e viene adattata alle esigenze specifiche di monitoraggio, senza alterare il gameplay e gli schemi fondamentali del gioco.

Per valutare la conformità e l'usabilità dell'exergame, è necessario condurre test preliminari con soggetti sani e successivamente con i pazienti, raccogliendo feedback per ottimizzare il game design [29].

Questa metodologia è supportata da studi precedenti che evidenziano l'importanza di un buon game design e di una grafica accurata nel migliorare l'esperienza di gioco.

Infatti, l'introduzione di alcune funzionalità all'interno dell'exergame per gestire i dati ottenuti può determinare un miglioramento nell'esperienza complessiva dell'utente, come, ad esempio:

- il log dei dati (registrazione ed archiviazione delle performance di gioco oppure dei movimenti effettuati) consente di ottenere informazioni dettagliate per analizzare e monitorare l'andamento dell'utente nel tempo.
- l'adattamento dinamico della difficoltà di gioco consente al sistema di regolare automaticamente il livello di complessità del gioco in funzione delle performance di gioco analizzate in tempo reale. Questo meccanismo permette di mantenere un livello di difficoltà adeguato, che aumenta se il giocatore ha successo e diminuisce in caso di difficoltà.

Queste informazioni sono fondamentali per valutare l'efficacia della terapia, apportare eventuali modifiche e personalizzare il trattamento in funzione delle esigenze specifiche del paziente.

In letteratura sono stati condotti vari studi sulla valutazione degli exergame dedicati agli arti superiori come ulteriore strumento di supporto alla riabilitazione e/o al monitoraggio della progressione della malattia. E' emerso che non esistono programmi standardizzati di esercizi per le esigenze specifiche associate ai disturbi motori della mano, causati dalla Malattia di Parkinson [17]. Dunque, sono stati presentati diversi SG, per creare un piano di allenamento volto ad incentivare l'utilizzo di specifiche tipologie di movimento.

Ad esempio, si è valutato come la riabilitazione mediante exergame abbia migliorato diversi aspetti legati alle funzionalità motorie degli arti superiori nelle persone affette da PD [6]. Nell'articolo [9] viene proposto il *Piano Game*, che simula un pianoforte con dieci tasti, ognuno corrispondente ad un dito di ciascuna mano. Durante il gioco, viene richiesto all'utente di premere un tasto con il dito indicato, mantenendo la mano aperta e piegando il dito specifico, finché lo strumento non emette la nota. I movimenti delle dita si focalizzano sulla coordinazione motoria e la destrezza manuale fine. Inoltre, il gioco include una sezione in cui viene richiesto all'utente di memorizzare una sequenza di tasti e successivamente ripeterli, introducendo uno specifico focus cognitivo sull'attenzione e la memoria. L'exergame *Grab Game* [9] prevede l'utilizzo del movimento di apertura e chiusura mano per afferrare e spostare gli oggetti nell'ambiente di gioco, con l'obiettivo di lavorare sulla flessione ed estensione delle dita, sulla destrezza manuale e sulla coordinazione motoria. Nel caso del *Pinch Game*, viene allenata la presa digitale tramite l'opposizione del pollice e dell'indice per ridurre o ingrandire la dimensione di un oggetto e, dunque, si focalizza sul recupero delle abilità motorie fini. Infine, nel *Flip Game* è richiesto all'utente di effettuare un movimento di prono-supinazione della mano, con il palmo inizialmente rivolto verso l'alto, per far cadere alcuni oggetti posizionati sul palmo della mano. Successivamente, il gioco introduce l'utilizzo di

entrambe le mani contemporaneamente, in modo da far cadere gli oggetti dalle mani nello stesso momento. In questo modo l'utente viene stimolato dal punto di vista cognitivo per coordinare il movimento di rotazione di entrambe le mani [9].

Uno tra i SG più recenti, dedicato alla valutazione dei disturbi motori degli arti superiori nella Malattia di Parkinson, è il *RehaBEElitation* [26][8].

Il gioco è ambientato in uno spazio 3D, sviluppato in Unity, che riproduce un alveare e l'obiettivo è produrre e raccogliere il miele. I task richiesti sono suddivisi in più minigiochi, in cui devono essere svolte determinate azioni per pilotare un'ape all'interno dell'ambiente circostante e portare a compimento i vari compiti.

I movimenti richiesti sono: presa digitale, presa palmare, prono-supinazione della mano, flessione-estensione della mano e rispecchiano i principali movimenti che consentono una valutazione dei disturbi motori tipici del Parkinson.

La sperimentazione per la valutazione della bradicinesia [26] è stata condotta su una popolazione sana e una parkinsoniana. Per quest'ultimi, il test è stato effettuato prima del trattamento farmacologico e circa 90 minuti dopo l'assunzione del farmaco, che ha determinato una riduzione della sintomatologia motoria durante la fase di gioco.

Il coinvolgimento attivo del paziente nelle attività di gioco può accelerare il processo di riabilitazione e determinare un aumento della motivazione, offrendo al contempo la possibilità di ridurre i costi ed incrementare l'accessibilità della riabilitazione domiciliare [6]. Anche dal punto di vista cognitivo è dimostrata la stimolazione di vari aspetti, tra cui l'attenzione e la memoria, che possono essere migliorate nei pazienti con PD [17], oltre che l'effetto positivo sulla stabilità emotiva del paziente e la riduzione dell'ansia [11].

Nello stato attuale, sono necessari e richiesti ulteriori studi, specialmente in un contesto domiciliare, per confermare la sicurezza e l'efficacia dell'uso degli exergame ed è emersa la necessità di includere analisi e valutazioni standardizzate della progressione della malattia.

Dunque, nella progettazione dell'exergame sono richieste le seguenti caratteristiche [6]:

- focalizzazione sulle peculiarità cliniche della malattia;
- maggior semplicità rispetto ai giochi commerciali;
- riduzione dei feedback negativi;
- istruzioni e obiettivi molto chiari;
- introduzione graduale di aspetti cognitivamente impegnativi;
- nuovi sistemi di exergame che non richiedano l'uso di piattaforme di equilibrio o controller.

Queste linee guida mirano a rendere gli exergame più adatti e accessibili alle esigenze specifiche delle persone con il Parkinson, consentendo una maggiore efficacia terapeutica e una maggiore partecipazione da parte dei pazienti.

L'innovazione degli exergame consiste nella riproduzione di uno spazio virtuale di gioco che consente un maggior coinvolgimento del paziente, distogliendo la sua attenzione dall'obiettivo terapeutico dell'esercizio.

2.1.1 Controller e dispositivi utilizzati

Per gli exergame individuati in letteratura, sono stati impiegati vari dispositivi e sensori per catturare il movimento. Per garantire il monitoraggio dei movimenti effettuati, possono essere utilizzate due tipologie di soluzioni: sistemi *wearable* o *markerless*.

Nei sistemi di tracciamento indossabili (*wearable*), è previsto il posizionamento di sensori o marker sul soggetto, come ad esempio sensori inerziali, per rilevare l'orientamento e la posizione della mano nello spazio.

Analizzando la *Human-Machine Interface* (HMI) di alcune applicazioni di exergame, in particolare, emerge lo studio condotto nel *RehaBEElitation* [8], in cui è previsto l'utilizzo di un guanto composto da:

- sensori inerziali, che consentono una stima della posizione della mano e tramite i quali l'utente interagisce con il gioco;
- sensori luminosi, mediante i quali è possibile stimare la presa palmare e digitale, come descritto in [8].

Dunque, è richiesto all'utente di indossare un guanto con sensori integrati.

I sistemi *wearable* presentano alcuni vantaggi, tra cui una maggior accuratezza nel monitoraggio dei movimenti e minor interferenza causata da fattori esterni, come l'illuminazione o la presenza di ingombri nell'area di gioco, poiché i sensori sono direttamente posizionati sul corpo del soggetto.

Gli svantaggi relativi ai sistemi indossabili [4], possono essere mitigati dai sistemi *markerless*, e sono:

- ingombro e comfort: i sistemi *markerless* non richiedono all'utente di indossare dispositivi aggiuntivi, eliminando così il problema dell'ingombro e potenzialmente migliorando il comfort durante l'esperienza di gioco o di monitoraggio dei movimenti.
- costi: le soluzioni indossabili possono risultare costose, e dunque meno accessibili ed utilizzabili nell'ottica della riabilitazione domiciliare.

Dunque, i sistemi *markerless* risultano essere soluzioni non invasive poiché non richiedono l'applicazione di dispositivi sul soggetto, riducendo la possibilità di

ottenere dati errati a causa di eventuali malposizionamenti dei sensori senza la supervisione di un esperto.

Nei sistemi di tracking markerless il tracciamento della mano è possibile mediante una telecamera *RGB-Depth* (RGB-D). La telecamera integrata all'interno di questi dispositivi è in grado di rilevare anche le informazioni relative alla profondità. L'informazione sulla profondità è fondamentale per comprendere la posizione tridimensionale della mano e migliorare la precisione del tracciamento dei movimenti durante la sessione di gioco.

In vari studi, sono stati impiegati il *Leap Motion Controller* (LMC) ed il *Microsoft Kinect*, per registrare i movimenti degli arti superiori senza la necessità di sensori o dispositivi posizionati sul corpo del paziente.

Il LMC genera l'immagine virtuale della mano, che consente al paziente di svolgere i movimenti correlati agli esercizi di riabilitazione proposti, come raccogliere oggetti, ordinare figure, suonare un pianoforte [9] etc. Questo dispositivo è composto da due telecamere e tre LED infrarossi, i cui dati grezzi vengono elaborati da un algoritmo che ne estrae le informazioni di profondità [30]. Le sue caratteristiche lo rendono uno strumento di acquisizione molto versatile, a basso costo e di elevata portabilità [6].

Anche il Kinect è particolarmente utile nella creazione di exergame con obiettivi riabilitativi o di monitoraggio, poiché consente il tracciamento dei movimenti del corpo nello spazio, senza la necessità del contatto fisico con dispositivi di input. Questa caratteristica facilita il monitoraggio dei movimenti e la valutazione della qualità del loro svolgimento [20]. Il Kinect è dotato di sensori aggiuntivi, quali sensori di profondità o tecnologia *time-of-flight*, che consentono di misurare la distanza tra la telecamera e gli elementi nell'immagine [30]. A differenza del LMC, il Kinect è in grado di rilevare lo *skeleton* di tutto il corpo e non consente di ricostruire la mano in dettaglio, ma si focalizza sul tracciamento di marker specifici, come quelli del polso e pollice, rilevati tramite algoritmi di Machine Learning. Inoltre, quest'ultimo dispositivo offre maggior libertà di movimento rispetto al LMC, che vincola lo svolgimento degli esercizi in un volume di spazio più ristretto e ben definito.

La HMI degli exergame illustrati nella Sezione 2.1 sfrutta esclusivamente la mano come interfaccia per interagire con il gioco [9] [20], eliminando drasticamente la problematica relativa all'ingombro dei sensori indossabili.

In conclusione, la tecnologia degli exergame:

- determina il coinvolgimento attivo dei pazienti in attività interattive e divertenti, migliorando la motivazione e l'aderenza alla terapia;
- consente di fornire feedback immediati sui movimenti durante gli esercizi, mediante l'utilizzo di dispositivi markerless o marker-based, restituendo una correzione istantanea del movimento e determinando il miglioramento dell'apprendimento motorio.

In particolare, l'utilizzo degli exergame in combinazione con i sistemi markerless introduce ulteriori vantaggi, quali:

- utilizzo senza contatto fisico: questi dispositivi non richiedono la necessità di indossare sensori o dispositivi aggiuntivi, offrendo una soluzione più accessibile;
- monitoraggio preciso dei movimenti, permesso dai controller, in grado di tracciare con precisione i movimenti del corpo e di consentire una valutazione accurata della mobilità o della posizione della mano senza impedimenti.

L'uso di dispositivi, come il Leap Motion Controller ed il Kinect, apre nuove prospettive nella progettazione di exergame terapeutici, contribuendo a rendere la riabilitazione più accessibile, coinvolgente ed efficace. Tuttavia, è fondamentale condurre ulteriori studi scientifici per supportarne e dimostrarne l'efficacia.

2.1.2 Utilità e criticità degli exergame attuali nel Parkinson

È dimostrato che il coinvolgimento del paziente nella sessione di gioco dell'exergame possa accelerare il processo di riabilitazione [20] e consenta il miglioramento delle funzioni cognitive [17]. Inoltre, l'impiego di dispositivi per il tracking della mano markerless aiuta ulteriormente l'utente a focalizzarsi sul task richiesto, senza impedimenti o elementi di difficoltà e distrazione aggiuntivi [14], facilitando l'eventuale utilizzo di questa tecnologia da remoto.

La valutazione degli exergame dedicati alla riabilitazione per gli arti superiori nel Parkinson è risultata essere positiva e promettente, ma nello stato attuale emerge la necessità di una maggiore specificità e controllo nei compiti richiesti, in quanto in alcuni casi la richiesta di gioco ha indotto l'utente ad incrementare la velocità di risposta al task, comportando una minor accuratezza e precisione del movimento effettuato [3].

Dunque, è richiesta una varietà di exergame più appropriati, specifici ed in linea con le necessità degli utenti finali, con l'obiettivo di suscitare maggior interesse in questi ultimi.

Si evince, inoltre, la richiesta di sviluppo di più exergame dedicati alla riabilitazione degli arti superiori, in quanto quelli presenti in letteratura sono incentrati principalmente sugli arti inferiori [29]. La mancanza di risultati standardizzati in questo ambito di ricerca rende ancora difficile determinare quale piattaforma e tipologia di exergame funzioni meglio per le specifiche esigenze dei pazienti con il Parkinson.

Tuttavia, dai risultati fino ad ora ottenuti emerge che gli exergame siano potenzialmente più efficaci della riabilitazione tradizionale [17] oppure che possano contribuire a potenziarne gli effetti.

2.2 User Experience e Usability degli exergame in letteratura

Per effettuare un'analisi completa degli aspetti e gli elementi fondamentali per la progettazione di un exergame con scopo terapeutico o di monitoraggio, è necessario individuare le linee guida per progettare al meglio l'interfaccia dell'applicazione e, dunque, rispettare i criteri di usabilità e valutare la UX.

L'usabilità è il parametro che valuta l'efficacia, l'accessibilità e la facilità di utilizzo di un sistema nel consentire all'utente di completare l'attività richiesta. Inoltre, misura il livello di soddisfazione e gradimento percepito dall'utente durante l'utilizzo.

I principi cardine dell'usabilità possono essere suddivisi come segue:

- *Learnability*, valuta quanto sia facile per gli utenti completare i compiti di base la prima volta che si confrontano con il sistema;
- *Efficiency*, misura quanto velocemente gli utenti riescano ad eseguire i task, dopo aver compreso il design del sistema;
- *Memorability*, esamina la facilità con cui gli utenti riescono a riacquisire una competenza, dopo un determinato periodo di tempo di inutilizzo del sistema;
- *Errors*, analizza il numero di errori commessi dagli utenti per portare a compimento un task;
- *Satisfaction*, misura il grado complessivo di soddisfazione degli utenti nelle interazioni con il sistema.

E' emerso che un game design con un'interfaccia grafica semplice ed essenziale, ma puntuale, è vantaggiosa rispetto ad un'interfaccia altamente dettagliata, che però non fornisce informazioni significative per lo svolgimento dell'exergame [24].

Dunque, la progettazione di un'interfaccia utente facile ed intuitiva è necessaria per rendere l'esperienza di gioco il più possibile semplice e coinvolgente. E' stato valutato l'inserimento di feedback sonori e visivi [9] per favorire la comprensione del corretto svolgimento del gioco ed assistere l'utente durante la sessione di allenamento.

Nello studio [9] è stata condotta un'indagine per raccogliere le opinioni dei partecipanti riguardo al loro grado di soddisfazione durante la sessione di gioco, al fine di valutare l'efficacia e l'accettazione del sistema proposto. E' stato richiesto di compilare un questionario per la valutazione dell'usabilità, suddivisa in: utilità, modalità di utilizzo e giocabilità. Le domande di ogni categoria sono inerenti, rispettivamente, al coinvolgimento suscitato nell'utente finale, alla valutazione degli esercizi richiesti ed infine alla valutazione degli elementi di gioco e della tecnologia utilizzata.

Dai risultati si evince una maggiore soddisfazione dal punto di vista dell'utilità e della giocabilità, pertanto risulta che gli exergame proposti siano stati considerati uno strumento utile per migliorare l'esperienza di riabilitazione e, di conseguenza, incrementare l'indipendenza degli utenti nello svolgimento di attività di vita quotidiana. Le valutazioni peggiori sono state ottenute nella categoria: modalità d'uso. La maggior parte dei partecipanti ha dichiarato che gli esercizi effettuati utilizzando entrambe le mani sono risultati più difficili rispetto a quelli unilaterali.

E' stata integrata la possibilità da parte dei fisioterapisti di modificare la sequenza ed il set di esercizi da svolgere durante l'exergame, in modo da adattare la tipologia di videogiochi presentata alle specifiche esigenze di ciascun paziente ed alla sua patologia. Questo consente di utilizzare lo stesso exergame per più patologie, in quanto non contiene elementi specifici e vincolanti, rendendolo più flessibile e facilmente riutilizzabile in funzione delle varie necessità. Inoltre, la progettazione dell'applicazione con un approccio modulare favorisce la futura introduzione di processi e nuove funzionalità, semplificando eventuali modifiche software. Dunque, la valutazione dell'usabilità dell'exergame, effettuata in fase di progettazione [8], può contribuire positivamente ad una significativa riduzione degli errori e problemi riscontrati nel sistema durante la fase di testing.

Capitolo 3

Materiali e metodi

3.1 Progettazione FARM Exergame

Considerando le necessità e le criticità attuali emerse, è stato ideato un exergame per gli arti superiori, dedicato alla popolazione parkinsoniana.

L'exergame, *FARM Exergame - La Fattoria per l'Allenamento e la Riabilitazione della Mano*, si concentra sull'utilizzo del movimento della mano con lo scopo di effettuare riabilitazione e/o il monitoraggio della progressione della patologia sulle capacità motorie dell'utente.

L'exergame è stato progettato ponendo particolare attenzione alle esigenze del target di utenti per cui è stato ideato. Al fine di adattarsi alle necessità delle persone anziane affette dalla Malattia di Parkinson, sono state introdotte varie scelte progettuali come, ad esempio, l'utilizzo di dimensioni di testo e di popup grandi per facilitare la lettura e la comprensione delle istruzioni di gioco.

L'ambientazione del gioco in una fattoria è stata scelta considerando il target di utenti finali. Questo ambiente è stato selezionato per rendere l'esperienza di gioco più rilassante e coinvolgente per gli anziani, anche sulla base dello stato dell'arte degli exergame già sviluppati, in cui è emerso questo impatto positivo [8]. Queste scelte sono state pensate per garantire un'esperienza di gioco che non solo possa intrattenere l'utente, ma che possa fornire anche benefici terapeutici, tenendo conto delle esigenze e delle capacità specifiche degli utenti affetti da questa patologia.

L'obiettivo del gioco consiste nel collezionare e consegnare un determinato numero di oggetti richiesti. Il numero e la tipologia di oggetti da prendere sono definiti e visualizzati inizialmente in una lista, in cui vengono illustrate le richieste.

La HMI dell'exergame è rappresentata dalla mano dell'utente, tramite cui avviene l'interazione con gli elementi di gioco.

Per lo svolgimento dei vari compiti, le gesture previste sono:

- presa palmare (*hand grasping*);

- intra-extra rotazione della mano aperta in dorsi-flessione (rotazione in senso orario e antiorario della mano, mantenendo la mano aperta in dorsi-flessione perpendicolarmente all'avambraccio);
- presa digitale (*finger tapping*);
- presa digitale continua (*finger pinching*).

La telecamera utilizzata consente il tracciamento della mano dell'utente e viene gestita tramite la creazione di un processo Python che funziona come "server", che determina l'apertura della telecamera durante l'esecuzione dell'exergame.

Il tracking della mano è consentito tramite l'utilizzo della libreria *cvzone*, che si basa su moduli già implementati da *MediaPipe*, descritti nel dettaglio nella Sezione 3.2.2. Il framework *MediaPipe*, sviluppato da Google per l'elaborazione di dati multimediali, viene utilizzato nello sviluppo dell'exergame per il rilevamento dei landmark della mano, identificati da modelli di deep learning pre-addestrati [25]. Dai landmark individuati si ricava lo skeleton della mano, necessario per interagire con gli elementi di gioco e sul quale viene effettuata la calibrazione delle gesture d'interazione, specifica per ogni utente. Dunque, i movimenti effettuati dall'utente vengono valutati e classificati in tempo reale (30 frame al secondo).

L'exergame è sviluppato nel Game Engine Unity ed è suddiviso in quattro scene:

- *Calibration*, all'inizio del videogioco, in cui viene effettuata la calibrazione delle gesture della mano virtuale, sulla base della mano dominante dell'utente;
- *Training*, in cui è possibile svolgere un allenamento volto ad apprendere le fondamentali gesture d'interazione con l'ambiente virtuale, prima di cominciare a giocare;
- *Exergame*, che rappresenta la scena di gioco;
- *mainMenu*, da cui è possibile accedere a tutte le altre scene, tramite dei pulsanti che fungono da collegamenti interattivi.

Di seguito è riportata la progettazione relativa a queste parti del sistema.

3.1.1 Fase di Calibrazione

All'inizio dell'exergame, per ogni utente è prevista una fase di calibrazione in cui viene richiesto di effettuare i movimenti presentati precedentemente, al fine di calcolare le soglie personalizzate di riconoscimento delle varie gesture. Come descritto in letteratura, senza la fase di calibrazione non si prenderebbe in considerazione il range di movimento specifico di ogni paziente, comportando il riconoscimento delle gesture in maniera non selettiva e personalizzata [8].

Per la calibrazione è stato scelto un approccio basato sulle soglie, in quanto più robusto rispetto all'utilizzo di un modello di apprendimento pre-addestrato per il riconoscimento delle gesture, come ad esempio il modello *Hand gesture recognition*, incluso all'interno di **MediaPipe** [25].

Infatti, la soluzione sviluppata da **MediaPipe** non consente il riconoscimento di tutte le gesture d'interesse per questo progetto di tesi, ma soltanto dell'hand grasping. Inoltre, non prevede la possibilità di introdurre una fase di calibrazione, in quanto il riconoscimento dei movimenti avviene automaticamente, come risultato della predizione fornita da un modello di rete neurale.

Un'ulteriore criticità legata a questo modello pre-addestrato può essere identificata nella dipendenza della predizione dai dati di addestramento, in quanto la robustezza del riconoscimento della gesture dipende dalla qualità e dalla diversità del dataset di allenamento utilizzato. Infatti, nel caso di persone con problemi motori, quali le persone affette dalla Malattia di Parkinson, il riconoscimento potrebbe risultare meno affidabile o determinare una predizione instabile dei movimenti che richiedono una precisione molto elevata. A causa dell'elevata variabilità e della scarsa riproducibilità dei movimenti effettuati da persone con problemi di motricità, creare un dataset specifico non sarebbe informativo ai fini del riconoscimento delle gesture, risultando in un sistema pronò ad errori di classificazione.

Tali errori sono cruciali, in quanto le difficoltà nell'interazione con il sistema determinano un allenamento inefficace, una probabile insoddisfazione dell'utente e, di conseguenza, un ridotto desiderio di ripetere il task nel tempo (continuità d'uso).

La calibrazione viene effettuata con l'esecuzione dei movimenti nella loro massima ampiezza e, dunque, considera il range di movimento specifico per ogni paziente, affinché ogni utente possa interagire in maniera efficace con il gioco. La calibrazione, inoltre, si configura in un'ottica di sviluppo futuro come una valutazione preliminare del deficit motorio. Infatti, potrebbe essere utilizzata sia per fornire un feedback ai medici sia per regolare autonomamente la complessità del gioco e dei movimenti richiesti.

3.1.2 Fase di Allenamento

La fase di allenamento è dedicata all'apprendimento da parte dell'utente delle interazioni con gli elementi di gioco.

La finalità del *Training* è quella di fornire all'utente un *warm-start*, in quanto consente di allenarsi sulle interazioni fondamentali, successivamente richieste nella fase di gioco. Questa sezione dell'exergame è progettata per simulare le principali interazioni, senza riprodurre fedelmente le dinamiche di gioco, in modo da consentire all'utente di familiarizzare e intuire i meccanismi di base, senza anticipare gli elementi di gioco. Durante questa fase non sono previste valutazioni delle performance ottenute, favorendo così un ambiente volto ad incentivare l'apprendimento.

In questo modo l'utente è libero di concentrarsi esclusivamente sulle dinamiche di gioco senza ulteriori fattori di stress o distrazioni.

Questa sezione dell'exergame è necessaria per valutare accuratamente la UX durante la successiva sessione di gioco, consentendo all'utente di concentrarsi anche sui feedback visivi e sonori in quanto già parzialmente consapevole dei movimenti da effettuare.

3.1.3 Fase di Gioco

Nella fase di gioco sono previsti quattro task principali. Inizialmente, viene presentata una lista di oggetti richiesti, contenente il numero dell'ordine in corso e il numero di prodotti da collezionare.

L'associazione tra oggetto e movimento richiesto è:

1. Task 1: presa palmare – raccolta delle uova;
2. Task 2: intra-extra rotazione – riempimento delle bottiglie di latte;
3. Task 3: presa digitale – raccolta delle ciliegie;
4. Task 4: presa digitale continua – spostamento di un'automobile sulla mappa per consegnare i prodotti collezionati.

I vari task sono stati suddivisi in più minigiochi presentati in sequenza. Questa scelta è stata effettuata sulla base dei progetti presentati in letteratura [29], in cui è emersa la versatilità dello sviluppo di un sistema modulare, in cui ogni minigioco non interferisce con il resto dell'applicazione e, di conseguenza, consente l'introduzione di ulteriori task. Dopo aver svolto i quattro minigiochi, l'exergame presenta all'utente una tabella punteggi, contenente il riepilogo della quantità di oggetti presi ed il punteggio ottenuto e fornisce la possibilità di ripetere il loop di gioco.

Per ogni ordine, vengono valutate le performance dell'utente, quali il punteggio ottenuto, il tempo impiegato ed il numero di errori commessi. Il conteggio degli errori è definito come segue:

1. numero di uova cadute, dopo essere state afferrate correttamente tramite il movimento richiesto;
2. nessuna tipologia di errore introdotta per il Task 2;
3. numero di ciliegie cadute, dopo essere state afferrate correttamente con il movimento richiesto;
4. numero di volte in cui la macchina non ha seguito la traiettoria specificata dalla mappa;

Le prestazioni ottenute in ogni sessione di gioco sono salvate opportunamente in un file JSON per le successive valutazioni.

3.2 Sviluppo Exergame

Durante lo sviluppo dell'exergame, sono state impiegate diverse tecnologie e strumenti.

La piattaforma di sviluppo utilizzata per la creazione dell'exergame è Unity. Il linguaggio Python viene utilizzato per la parte di analisi delle immagini provenienti dalla telecamera e C# per implementare il controllo del flusso di gioco, la logica di interazione ed ulteriori funzionalità in Unity.

3.2.1 Gestione telecamera

L'acquisizione della mano avviene tramite l'utilizzo di una telecamera RGB dedicata (Logitech C920 PRO, caratterizzata da una risoluzione Full HD a 1080p e 30 fps), gestita mediante `cv2`, interfaccia di Python per interagire con `OpenCV`.

Open Source Computer Vision (OpenCV) è una libreria Open Source dedicata all'acquisizione di immagini e video, all'elaborazione di immagini ed inoltre, tramite una serie di modelli pre-addestrati e varie funzionalità, consente il rilevamento di oggetti o pattern [28].

In un file JSON di configurazione sono definiti alcuni parametri, tra cui il numero della telecamera da utilizzare, per consentire una configurazione dinamica e modificabile in funzione delle specifiche esigenze, come descritto nella Sezione 3.2.6. Il numero della telecamera può essere impostato, per consentire di modificare la sorgente desiderata per l'acquisizione del flusso video, rendendo quindi l'exergame compatibile con altre tipologie di telecamere.

3.2.2 Hand Tracking

Il tracking della mano è stato sviluppato utilizzando la libreria `cvzone`, in particolare il modulo `HandTrackingModule`, che semplifica il processo di rilevamento e tracciamento della mano in real-time. Questo modulo sfrutta alcune funzionalità, appartenenti ad `OpenCV` e `MediaPipe`.

Il modello di *Deep Learning* (DL) di `MediaPipe`, utilizzato per il tracciamento delle mani, è progettato per lavorare con immagini o frame provenienti da una videocamera. La rete è addestrata per identificare i landmark delle mani in un'immagine [5] [25], dove ogni landmark rappresenta una posizione specifica sulla mano, come la punta delle dita, il polso, etc. Il modello di rete estrae le feature significative dalle immagini e stima le posizioni tridimensionali dei landmark sulla mano. Le coordinate dei landmark ottenute dal tracking sono espresse in un sistema di riferimento tridimensionale (x,y,z), in cui la componente relativa alla profondità (z) è il risultato di una stima della posizione della mano nello spazio, predetta da `MediaPipe`.

Il modello della mano ottenuto da **MediaPipe** viene rappresentato con 21 punti chiave (X_i, Y_i, Z_i), in cui i rappresenta il numero del landmark considerato, illustrati in Figura 3.1.



Figura 3.1. Landmark della mano.

La gestione dei dati relativi al tracking della mano in Unity verrà trattata in dettaglio nella Sezione 3.2.4.

Il metodo utilizzato per il rilevamento delle mani consente di impostare alcune soglie per definire un livello di specificità nella detection della mano e scegliere il numero massimo di mani da rilevare. Vengono fornite da questo metodo ulteriori informazioni relative alla mano individuata, come il tipo di mano (**handType**, destra o sinistra), la bounding box (**bbox**) contenente le coordinate dei quattro punti che delimitano l'area in cui si trova la mano e la lista delle coordinate dei landmark (**lm**).

L'Hand Tracking in real-time (almeno 30 frame al secondo) è fondamentale per rilevare e classificare i movimenti della mano effettuati dall'utente durante l'exergame, consentendo così una risposta dinamica del gioco in funzione delle gesture eseguite.

3.2.3 Comunicazione Client/Server

Per supportare l'interazione tra il sistema di gestione dell'Hand Tracking e Unity, è stato creato un server in locale, tramite **socket**.

Questo server utilizza il protocollo *User Datagram Protocol* (UDP) per inviare dati dal sistema Python al client Unity. L'UDP è un protocollo del Livello 4 (Transport Layer) del modello ISO/OSI.

A differenza del *Transmission Control Protocol* (TCP), UDP è *connectionless* e non garantisce la consegna di tutti i pacchetti di dati, né il controllo di flusso. Dunque, una volta inviati i dati tramite UDP, non viene stabilita alcuna connessione formale tra client e server, e non c'è garanzia che i dati raggiungano la destinazione né che la raggiungano nell'ordine corretto.

La scelta di utilizzare il protocollo UDP, piuttosto che TCP, è determinata dall'esigenza specifica di comunicazione in real-time, poichè garantisce:

- bassa latenza, in quanto non viene effettuato il controllo e la conferma della ricezione dei dati;
- comunicazione asincrona, che consente la perdita di alcuni pacchetti senza la necessità di aspettare la ritrasmissione di quest'ultimi;
- complessità minore, meno *overhead* rispetto al TCP.

L'UDP viene utilizzato soprattutto in applicazioni in cui la perdita di alcuni pacchetti di dati non costituisce una criticità.

Nell'exergame sviluppato, gli svantaggi associati all'uso dell'UDP non influiscono sull'applicazione, poichè il protocollo viene utilizzato per la comunicazione in locale.

Le informazioni trasmesse, tramite il protocollo di comunicazione appena descritto, includono:

- Coordinate (x,y,z) relative ai 21 landmark della mano nel sistema di riferimento di `MediaPipe`, Figura 3.1;
- Risoluzione della webcam, (`width`, `height`);
- `handType`;
- Distanza di riferimento tra i landmark `lm[0]` e `lm[17]`, (`ref_distance`), descritta dettagliatamente nella Sezione 3.2.6;
- Fattore di scala per riscalarla la dimensione della mano al variare della distanza dalla telecamera, (`scale_factor`), metodo illustrato nell'Equazione 3.5.

3.2.4 Sistemi di riferimento Hand Tracking e Unity

Il tracking della mano utilizza come unità di misura i *pixel* per descrivere le coordinate dei punti della mano, acquisita tramite telecamera.

Il sistema di riferimento relativo all'acquisizione ed all'elaborazione dello streaming video è bidimensionale, in quanto strettamente associato alla tecnologia utilizzata (telecamera RGB) ed è il seguente, per convenzione:

- asse x (orizzontale) cresce da sinistra a destra;
- asse y (verticale) cresce dall'alto verso il basso.

L'origine del sistema di riferimento (0, 0) è situato in alto a sinistra.

In Unity, il sistema di coordinate è tridimensionale ma, essendo un sistema di coordinate virtuale, non corrisponde direttamente ai pixel dell'immagine associati

allo streaming video.

Per comprendere la conversione delle coordinate dei landmark da `MediaPipe` a Unity, è necessario distinguere i sistemi di riferimento disponibili in Unity:

- *globale* (X, Y, Z), che rappresenta l'intero ambiente virtuale Unity. Le coordinate all'interno di questo sistema costituiscono le coordinate assolute e l'origine del sistema globale è posizionata al centro della scena;
- *locale* (x, y, z), relativo ad ogni `GameObject`, la cui origine è centrata sull'oggetto stesso. Le coordinate locali descrivono la posizione, la rotazione e lo scaling, relativi all'oggetto specifico, indipendentemente dal sistema globale.

Per integrare il sistema di tracciamento della mano in Unity, è essenziale convertire correttamente le coordinate del sistema di riferimento della telecamera (in pixel) nel sistema di coordinate di Unity (in u.a., unità arbitrarie).

Questo implica la necessità di gestire le differenze di scala e l'allineamento appropriato delle coordinate tra i due sistemi.

Le informazioni ottenute dal server tramite il protocollo UDP sono utilizzate per definire gli offset da applicare per convertire il sistema di coordinate e garantire una rappresentazione accurata della mano nello spazio di gioco di Unity.

I parametri definiti sono i seguenti:

- `scaling` per effettuare una traslazione delle coordinate, mediante l'Equazione:

$$\text{scaling} = \frac{30 \times \text{width}}{640} \quad (3.1)$$

Regola l'ampiezza del movimento della mano in Unity. Valori di `scaling` minori consentono uno spostamento su una porzione di spazio maggiore;

- `offsetx`:

$$\text{offsetX} = \frac{\text{width}}{2 \times \text{scaling}} - 4 \quad (3.2)$$

- `offsety`:

$$\text{offsetY} = \frac{\text{height}}{2 \times \text{scaling}} - 2 \quad (3.3)$$

- `offsetz`:

$$\text{offsetZ} = (\text{scale factor} \times 8) - 2 \quad (3.4)$$

calcolati per centrare il sistema di riferimento dell'Hand Tracking all'interno della scena di Unity.

Le costanti introdotte per la correzione degli offset sono state determinate empiricamente. Le variabili `width` e `height` sono state definite nella Sezione 3.2.3.

3.2.5 Introduzione della componente di profondità

Essendo stata impiegata per l’acquisizione video una telecamera RGB, è necessario elaborare la profondità spaziale (coordinata Z) nel sistema di riferimento 3D di Unity.

Il sistema di Hand Tracking fornisce una stima della coordinata Z, valutando la posizione dei landmark rispetto a quella del polso ($lm[0]$) di coordinate (X_0, Y_0, Z_0) . Questo metodo non fornisce un risultato accurato, a causa di alcune criticità.

Nel sistema di tracking:

1. la coordinata Z del landmark relativo al polso è sempre pari a zero $(X_0, Y_0, 0)$ che è definito come punto di riferimento;
2. la profondità degli altri landmark è calcolata rispetto ad $lm[0]$ e rappresenta una distanza relativa. Dunque, non è possibile calcolare o stabilire la reale distanza della mano dalla telecamera, in quanto al variare della posizione di $lm[0]$ nello spazio, la coordinata Z_0 sarà sempre pari a zero.

In Unity:

3. il sistema di coordinate descritto non consente una corretta valutazione delle distanze tra i landmark, al variare della distanza della mano dalla telecamera. Infatti, avvicinando la mano alla telecamera essa occuperà una porzione in pixel maggiore, risultando “più grande” piuttosto che “più vicina” alla telecamera. Ciò comporta un calcolo errato delle distanze tra i landmark, che non corrisponde a quelle reali.

Il problema descritto al Punto 2 non influisce direttamente nello sviluppo del lavoro di tesi, poichè non è d’interesse rilevare la distanza o le dimensioni della mano in metri ai fini del corretto svolgimento dell’exergame.

La soluzione adottata per la risoluzione della criticità esaminata al Punto 2, che comporta il Punto 3 in Unity, consiste nell’introduzione di un fattore di scala. Questo parametro consente di valutare lo spostamento della mano lungo l’asse Z e di determinarne il ridimensionamento complessivo, in funzione della distanza della mano dalla telecamera. Il fattore di scala (`scale_factor`) è definito come segue nell’Equazione 3.5:

$$\text{scale factor} = \frac{d(lm[0], lm[17])}{\text{ref.distance}} \quad (3.5)$$

in cui

$$d(lm[0], lm[17]) \quad (3.6)$$

rappresenta la distanza euclidea tra i punti $lm[0]$ e $lm[17]$, definita nell’Equazione 3.7:

$$d(P_2, P_1) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (3.7)$$

Infine, il parametro `ref_distance` consiste in un valore fisso della distanza espressa mediante l'Equazione 3.6.

Il calcolo della `ref_distance` verrà illustrato dettagliatamente nella Sezione 3.2.6.

Tramite l'introduzione del fattore di scala nella conversione del sistema di riferimento in Unity, è possibile valutare la traslazione della mano nello spazio tridimensionale. All'aumentare della distanza calcolata nell'Equazione 3.7, aumenta lo scale factor, che si traduce in una minore distanza tra la mano e la telecamera.

E' fondamentale effettuare la fase di calibrazione, per individuare la dimensione di riferimento di una porzione della mano (`ref_distance` calcolata come distanza euclidea tra `lm[0]` e `lm[17]`), utilizzata per riscaldare la mano al variare della sua distanza dalla telecamera, come visto nell'Equazione 3.5.

I parametri definiti nelle Equazioni 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 sono stati utilizzati per riscaldare le coordinate dei punti dei landmark della mano (x_i, y_i, z_i) come segue:

$$x_i = \frac{x_i}{\text{scaling}} - \text{offsetX} \quad (3.8)$$

$$y_i = \frac{y_i}{\text{scaling}} - \text{offsetY} \quad (3.9)$$

$$z_i = \frac{z_i}{\text{scaling}} + \text{offsetZ} \quad (3.10)$$

Alle componenti x ed y sono stati applicati ulteriori offset per adattare e correggere lo spostamento orizzontale e verticale, in funzione della traslazione lungo l'asse z.

$$x_i = x_i - \frac{\text{offsetZ}}{2} \quad (3.11)$$

$$y_i = y_i - \frac{\text{offsetZ}}{4} \quad (3.12)$$

La conversione descritta consente il tracciamento della mano nelle coordinate spaziali, a partire da una tecnologia che non fornisce informazioni relative alla componente di profondità.

3.2.6 Calibrazione

È stato sviluppato come metodo di riconoscimento delle gesture un metodo a soglia. Le soglie sono calcolate durante la fase di calibrazione, suddivisa in diverse tipologie di movimento da effettuare ripetutamente per un determinato intervallo di tempo.

Nel file JSON di configurazione sono presenti alcuni parametri utili per la calibrazione, quali:

- `timerCalibration`, che indica l'intervallo di tempo in cui viene richiesto di effettuare un movimento;
- `calibrationPath`, che, dopo aver effettuato l'accesso alla scena Calibrazione, fornisce il percorso relativo all'ultima calibrazione svolta per quello specifico utente.

All'interno della scena in Unity sono stati introdotti video dimostrativi del movimento richiesto e alcuni popup informativi contenenti le istruzioni da seguire.

Per ogni acquisizione è prevista una durata di tempo definita dal parametro `timerCalibration`, avviata in risposta ad un input da tastiera (in particolare, la pressione del tasto *spazio*). Le soglie di calibrazione consentono di determinare se una gesture è stata eseguita correttamente.

Il primo passaggio consiste nell'acquisizione di `ref_distance`, rappresentata dalla distanza di riferimento tra i landmark 0 e 17 della mano.

Il calcolo di questa distanza, definito nell'Equazione 3.6, avviene come descritto dal setup sperimentale adottato, dettagliato nella Sezione 4.2. Il parametro viene calcolato come la media dei valori acquisiti nell'intervallo di tempo definito, mantenendo la mano aperta ad una distanza fissa e definita, come illustrato in Figura 3.2.

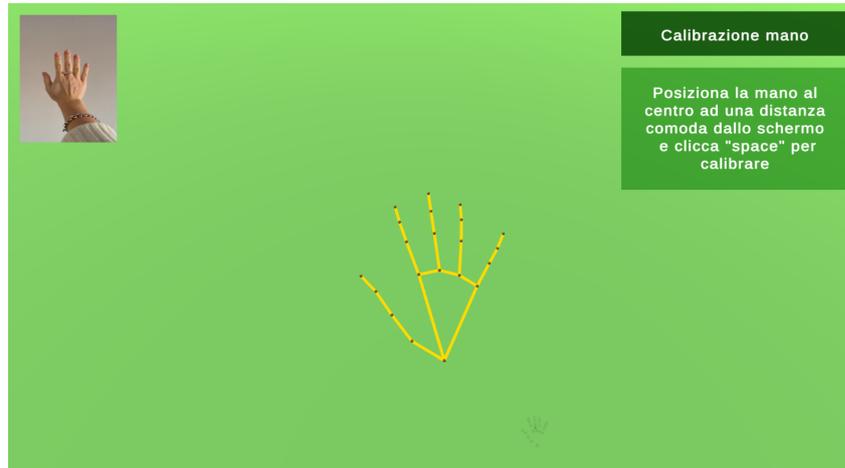


Figura 3.2. Visualizzazione della fase di calibrazione.

Stabilire il valore di `ref_distance` consente il ridimensionamento dinamico della mano tramite il fattore di scala, precedentemente descritto, e consente di procedere con l'elaborazione dei valori delle soglie di riconoscimento.

Nella fase di calibrazione per il rilevamento delle gestore della mano, le soglie vengono determinate mediante l'elaborazione di una serie di valori, che rappresentano la distanza tra due landmark specifici. I valori sono ottenuti dalle misurazioni effettuate per ogni frame acquisito durante un periodo di tempo determinato. Il sistema acquisisce i dati sulla variazione della distanza tra i landmark specifici, in funzione del movimento da individuare. Dunque:

1. la distanza tra il landmark 0 (associato al polso) e il 12 (associato all'estremità del dito medio). Questa distanza (0-12) viene utilizzata per determinare la soglia della presa palmare;
2. la distanza tra il landmark 4 (associato all'estremità del pollice) e l'8 (associato all'estremità dell'indice). Questa distanza è impiegata per il calcolo delle soglie sia per la presa digitale che per la presa digitale continua.
3. nel caso della intra-extra rotazione della mano, viene effettuata la media sui valori relativi all'angolo di rotazione della mano, calcolato nel piano XY utilizzando le informazioni date dai landmark 0 e 12.

Per l'elaborazione delle informazioni descritte al Punto 3, il sistema acquisisce i dati relativi all'angolo di rotazione tra i due landmark specifici, mediante l'Equazione 3.13:

$$\text{angle} = \text{rad2deg}(\tan(\text{deltaY}, \text{deltaX})) + 180^\circ \quad (3.13)$$

espresso in gradi, in cui `deltaY` rappresenta la differenza della componente Y e `deltaX` la differenza della componente X, tra i landmark 0 e 12.

Gli angoli di rotazione, compresi tra 270 e 360 gradi e tra 180 e 270 gradi, sono stati normalizzati tra 0 e 180 gradi, per ottimizzare il successivo calcolo del valor medio e rispettare le specifiche dell'exergame. Infatti, l'utilizzo dei dati ottenuti senza l'applicazione della normalizzazione influirebbe sul valor medio finale della soglia, alterando significativamente il suo reale valore.

La scena relativa alla fase di calibrazione del movimento di rotazione della mano è illustrata in Figura 3.3.



Figura 3.3. Fase di calibrazione della gesture: intra-extra rotazione della mano.

La procedura sviluppata per il calcolo delle soglie si svolge attraverso una serie di passaggi comuni per tutte le tipologie di movimento.

Inizialmente, i dati calcolati durante l'intervallo di acquisizione sono raccolti e ordinati in una lista di elementi. Successivamente, viene effettuata una fase di preparazione dei dati, finalizzata ad escludere un numero stabilito di frame nella fase iniziale e finale dell'intervallo, in modo da ridurre i dati meno significativi. Si procede con il calcolo della soglia, pari al valor medio calcolato su una percentuale predefinita di valori. Nel caso della rotazione della mano, è stato stabilito di effettuare il calcolo di due soglie, la prima per gli angoli di rotazione in senso orario (compresi nell'intervallo 0° , 90°) e la seconda per quelli in senso antiorario (compresi tra 90° e 180°), in modo da non compromettere i risultati.

Ogni soglia viene incrementata di una percentuale prestabilita (25%) per considerare la variabilità dei movimenti svolti e, di conseguenza, incrementare la tolleranza

delle soglie, come segue:

$$\begin{aligned}
 \text{openThr} &= \text{openThr} + 0.25 \times \text{openThr} \\
 \text{tapThr} &= \text{tapThr} + 0.25 \times \text{tapThr} \\
 \text{rotationDxThr} &= \text{rotationDxThr} - 0.25 \times (\text{rotationDxThr} - 90) \\
 \text{rotationSxThr} &= \text{rotationSxThr} + 0.25 \times (90 - \text{rotationSxThr})
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

E' stato impiegato il calcolo della soglia mediante il valor medio per ridurre eventuali outlier nei dati, fornendo così una stima più affidabile dei risultati.

Database e grafici

Dalla scena *mainMenu*, riportata in Figura 3.4, è possibile accedere alle altre sezioni dell'applicazione, inserendo il codice ID richiesto.



Figura 3.4. Visualizzazione del menù principale nella scena *mainMenu*.

Tramite l'ID, un codice alfanumerico univoco per ogni utente, si può accedere e consultare il database in locale contenente i risultati ottenuti dalla calibrazione e le performance relative alla fase di gioco.

In ogni cartella utente sono presenti le performance di gioco e i dati relativi alle calibrazioni effettuate con i rispettivi grafici.

I grafici rappresentano i valori acquisiti durante l'intervallo di calibrazione e la relativa soglia calcolata per ogni gesture, come in Figura 3.5, 3.6 e 3.7.

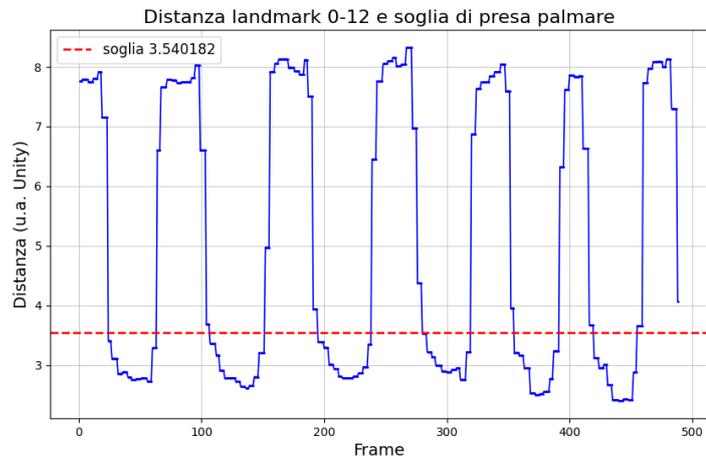


Figura 3.5. Grafico relativo alla soglia individuata per la presa palmare.

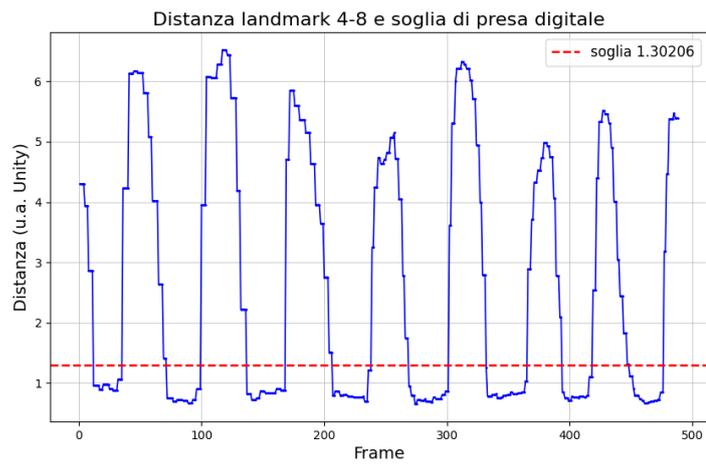


Figura 3.6. Grafico relativo alla soglia individuata per la presa digitale.

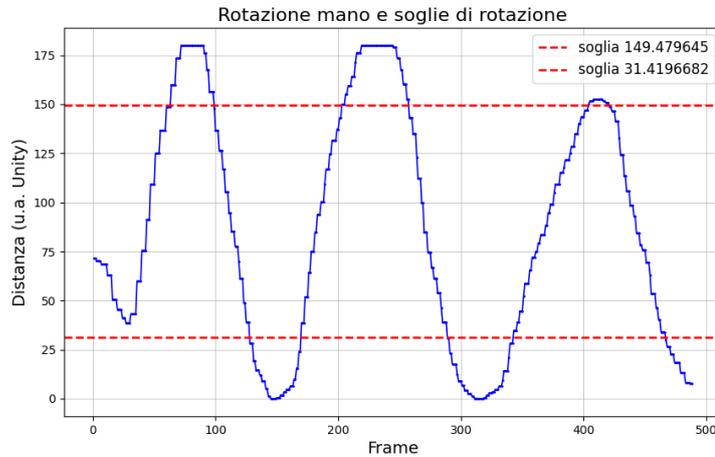


Figura 3.7. Grafico relativo alle soglie individuate per l'intra-extra rotazione della mano.

La discussione dettagliata dei risultati ottenuti viene fornita nel Capitolo 5.

Le soglie di movimento ottenute dalla fase di calibrazione sono salvate in un file JSON.

All'interno del file di calibrazione sono presenti i seguenti parametri:

- `handType`, per indicare la mano rilevata in fase di calibrazione;
- `ref_distance`, necessaria per il ridimensionamento della mano in Unity;
- `openThr`, soglia individuata per il riconoscimento della gesture *hand grasping*;
- `tapThr`, soglia individuata per il riconoscimento del *finger tapping*;
- `rotationDxThr`, prima soglia individuata per il riconoscimento della rotazione della mano in senso orario;
- `rotationSxThr`, seconda soglia individuata per il riconoscimento della rotazione della mano in senso antiorario.

3.2.7 Exergame

Nella fase di gioco si introduce il controllo del riconoscimento delle gesture della mano, dopo aver individuato le soglie in fase di calibrazione.

Il procedimento si articola nel seguente modo:

- attraverso il modulo **HandTracking**, vengono ottenute le coordinate dei landmark;
- le distanze tra i landmark vengono confrontate con le soglie precedentemente individuate.

Questo confronto avviene per tutti i task, ciascuno corrispondente ad una specifica gesture:

1. presa palmare (*hand grasping*): se la distanza tra il landmark 12 ed il landmark 0 risulta essere inferiore alla soglia corrispondente (**openThr**), la mano viene classificata come “aperta”; altrimenti, viene considerata “chiusa”;
2. presa digitale (*finger tapping*): per il riconoscimento della presa digitale, si considera la distanza tra i landmark 4 e 8. Se la distanza risulta al di sotto della soglia prestabilita (**tapThr**), il sistema riconosce il “tap” dell’indice e pollice;
3. intra-extra rotazione della mano: per cui viene calcolato l’angolo di rotazione (come in fase di calibrazione) e confrontato con le relative due soglie.

Altre possibili configurazioni della mano o movimenti non riconducibili alle gesture principali non sono classificati.

Il loop di gioco è suddiviso in più minigiocchi, al fine di utilizzare un approccio di programmazione “modulare”, che consente di gestire separatamente ogni task. Il passaggio tra un minigioco e l’altro è consentito attraverso lo spostamento automatico della telecamera virtuale in Unity (*Main Camera*). La telecamera viene gestita tramite la libreria **CineMachine** di Unity, ampiamente utilizzata per semplificare e migliorare il processo di creazione di inquadrature dinamiche all’interno di applicazioni interattive. La transizione da un minigioco all’altro può essere triggerata tramite un input da tastiera, *spazio*, oppure automaticamente dopo aver completato il task attualmente in corso.

In ogni sezione dell’exergame sono presenti popup contenenti le istruzioni di gioco ed i video dimostrativi della gesture richiesta per quello specifico task. Questi elementi informativi sono stati introdotti per incrementare l’efficacia e l’aderenza alla terapia attraverso gli exergame, come osservato in letteratura [6] [9].

L'associazione tra il movimento previsto dalla riabilitazione della mano e l'azione riprodotta nell'exergame è il più possibile aderente alla realtà, al fine di incrementare la qualità della UX dell'utente e facilitare la comprensione delle interazioni dell'exergame [3]. Inoltre, il posizionamento delle componenti di gioco nello spazio 3D all'interno della scena è volto a migliorare la percezione spaziale degli elementi, posti a diverse altezze e profondità, e contribuisce a creare un ambiente di gioco più immersivo e coinvolgente.

All'inizio del loop di gioco, viene visualizzata una lista dell'ordine corrente, in cui sono riportate la tipologia e la quantità di prodotti da collezionare, come illustrato in Figura 3.8.



Figura 3.8. Visualizzazione iniziale della lista di prodotti richiesti nella scena *Exergame*.

Il completamento di un ordine avviene in quattro fasi, ciascuna delle quali viene gestita attraverso un minigioco dedicato.

Task 1 - Raccolta delle uova

Procedendo con il primo minigioco, Task 1 (“Raccolta delle uova”), la *Main Camera* viene posizionata in un’area in cui sono presenti le uova da prendere e inserire in un cestino, eseguendo il movimento di presa palmare.

Per afferrare l’oggetto, è necessario effettuare il movimento di chiusura della mano nell’intorno dell’oggetto e successivamente aprire la mano in prossimità del cestino per rilasciarlo e, dunque, collezionarlo correttamente.

In Figura 3.9 è riportata la visuale della *Main Camera* definita per questo task.



Figura 3.9. Visuale della Main Camera in Unity per il Task 1 (movimento richiesto: presa palmare).

Task 2 - Riempimento delle bottiglie

Il secondo minigioco, Task 2 (“Riempimento delle bottiglie”), consiste nel riempimento di un determinato numero di bottiglie di latte, mediante l’apertura-chiusura di una valvola attraverso l’intra-extra rotazione della mano. Per collezionare correttamente un elemento, viene richiesto all’utente di ruotare la valvola in senso orario e successivamente in senso antiorario, come indicato dalla freccia in Figura 3.10. Il movimento viene valutato, verificando che l’angolo di rotazione della mano calcolato sia rispettivamente maggiore (verso orario) e minore (verso antiorario) dei valori di soglia stabiliti.



Figura 3.10. Visuale della Main Camera in Unity per il Task 2 (movimento richiesto: intra-extra rotazione della mano in dorsi-flessione).

Task 3 - Raccolta delle ciliegie

Il task successivo prevede il movimento di presa digitale per poter afferrare e inserire le ciliegie nel cestino. Analogamente al Task 1, il minigioco Task 3 (“Raccolta delle ciliegie”) richiede di effettuare la presa digitale per afferrare l’oggetto e l’apertura delle dita della mano (pollice e indice) per rilasciarlo in prossimità del cestino, come illustrato in Figura 3.11.



Figura 3.11. Visuale della Main Camera in Unity per il Task 3 (movimento richiesto: presa digitale).

Task 4 - Consegna dell'ordine

Per portare a compimento il Task 4 - “Consegna dell'ordine” - i prodotti precedentemente collezionati devono essere consegnati, mediante lo spostamento di un'automobile su una mappa. La macchina deve essere tralata e trascinata dall'area di partenza fino alla destinazione evidenziata in Figura 3.12, mantenendo la mano in configurazione di presa digitale.

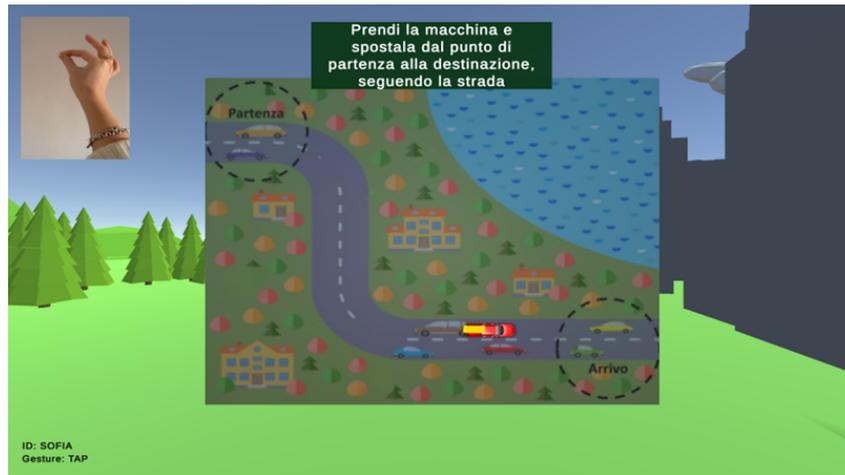


Figura 3.12. Visuale della Main Camera in Unity per il Task 4 (movimento richiesto: presa digitale prolungata).

Interazione della mano con gli elementi di gioco

Per poter interagire con gli elementi di gioco, viene effettuato un controllo sul movimento rilevato e classificato.

Quando un oggetto (*GameObject*) viene toccato dai punti corrispondenti ai landmark della mano (*Point*), è necessario valutare la gesture effettuata in quell'istante di tempo per determinare se l'oggetto sia stato afferrato. Infatti, nel caso dei Task 1 e Task 3, l'oggetto è considerato “afferrato” se la gesture svolta coincide con quella richiesta, mentre l'oggetto viene toccato. Per aumentare la precisione dell'interazione nel gioco, sono stati selezionati soltanto alcuni landmark della mano per valutare il contatto con l'oggetto da prendere. In particolare, nel Task 3, vengono valutati i landmark relativi al dito indice e medio (rappresentati rispettivamente dai landmark numero 3 e 4, 7 e 8).

Se la condizione di contatto e la valutazione della gesture sono rispettate, allora l'oggetto viene effettivamente afferrato, ancorando il *GameObject* ad un landmark della mano per consentirne lo spostamento. Finché la gesture valutata equivale a quella richiesta, l'oggetto segue la posizione del landmark a cui è connesso. Nello specifico:

- Nel Task 1, il *GameObject* afferrato assume la posizione relativa al landmark corrispondente al centro della mano.
- Nel Task 3, la posizione del *GameObject* afferrato è pari a quella del landmark corrispondente all'estremità del dito pollice.

Al variare della gesture effettuata, la condizione di presa non è più rispettata, causando il distacco dell'oggetto dalla mano e riabilitando le proprietà fisiche dell'oggetto.

Durante il processo di classificazione delle gesture, è stato inserito un *buffer* per la valutazione della gesture effettuata su più frame. Questo controllo consente di gestire e migliorare la stabilità della predizione della gesture. Infatti, la classificazione della gesture potrebbe variare per alcuni frame, determinando il rilascio involontario dell'oggetto. Ciò può essere provocato da condizioni indipendenti dall'utente, come, ad esempio, il mancato rilevamento o l'errata posizione di alcuni landmark della mano, con conseguente calcolo delle distanze tra i landmark errato. Dunque, è necessario gestire le inconsistenze dovute ai meccanismi dell'applicazione al fine di garantire un'interazione stabile e coerente con l'oggetto manipolato.

Nel caso della intra-extra rotazione della mano (Task 2), l'interazione di gioco è differente da quella specifica per la presa degli oggetti. In particolare, la rotazione della valvola è consentita semplicemente attraverso il contatto della mano, indipendentemente dal landmark. Dunque, il riempimento di una bottiglia è consentito soltanto valutando che l'angolo di rotazione della mano, nella configurazione precedentemente definita e in contatto con la valvola, rispetti le soglie prestabilite.

Infine, nel Task 4, relativo alla "Consegna dell'ordine", viene richiesto all'utente di effettuare il movimento di presa digitale per afferrare la macchina, esclusivamente nell'area di partenza evidenziata. Dunque, la condizione di presa è determinata dall'area definita in cui svolgere la gesture specifica. Nella condizione in cui la macchina risulta "afferrata", è stato scelto di non mostrare il tracking della mano sulla mappa. Questa scelta progettuale è determinata per facilitare la visualizzazione del *GameObject* "macchina" sulla mappa, la cui traslazione rappresenta lo spostamento effettuato dalla mano e dunque il tracking. In particolare, la posizione della macchina in condizione "afferrata" viene aggiornata per ogni frame con la posizione relativa al landmark dell'estremità del pollice.

Feedback utente

Negli exergame con finalità terapeutiche, la componente relativa alla performance (*primary goals*) viene rivalutata, in quanto ci si focalizza maggiormente sul contesto in cui l'exergame è svolto e sulla condizione patologica dell'utente finale [29] [20]. Si pone particolare attenzione ai *secondary goals* [29], dunque, alle corrette modalità con cui una determinata azione deve essere svolta.

Per facilitare il conseguimento degli obiettivi secondari, è utile introdurre ulteriori istruzioni per l'utente mediante elementi visivi o sonori che favoriscano la

comprensione delle interazioni, come ad esempio l'utilizzo dell'*halo*, dettagliato nel Capitolo 4.1. Questa tecnica è stata impiegata per i task che richiedono la “presa” di un oggetto, dunque in Task 1 e Task 3, e consente di evidenziare l'oggetto toccato dai landmark della mano (Figura 3.13 e 3.14).

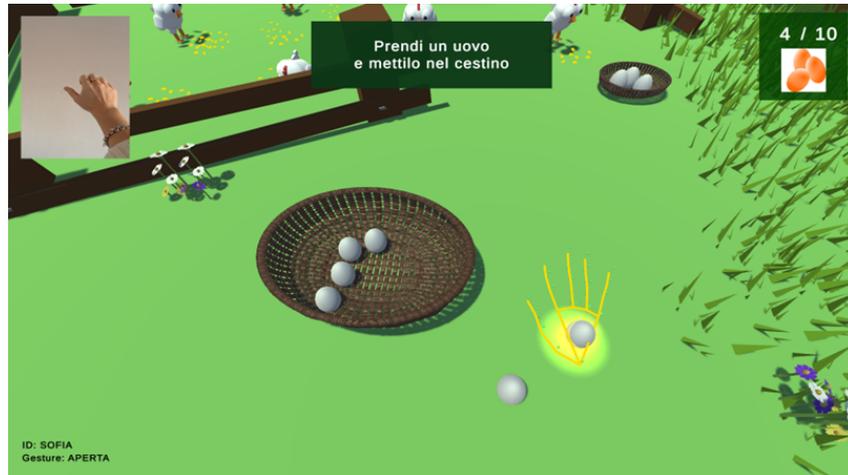


Figura 3.13. Visualizzazione dell'*halo* nel Task 1.



Figura 3.14. Visualizzazione dell'*halo* nel Task 2.

Questo ausilio visivo è stato impiegato anche nella Fase di Training, illustrata nella Sezione 3.2.8.

I feedback di errore sono volti a facilitare la comprensione dell'interazione errata commessa, senza focalizzarsi sull'errore in sé, ma piuttosto sulla prevenzione degli errori futuri.

Sono stati introdotti dei feedback di errore in ogni task, ad esclusione del Task 2. In particolare, in Task 1 e Task 3 gli avvisi di errore consistono in feedback sonori, mentre nel Task 4 è stato scelto un feedback visivo.

Per il Task 1 e Task 3, i feedback sonori sono triggerati dalla condizione: “oggetto caduto”, rappresentata da un oggetto correttamente afferrato e rilasciato, ma non in corrispondenza del *Box Collider* relativo al cestino, in cui l’oggetto deve essere inserito.

Nel Task 4, la condizione di errore è determinata dall’uscita della macchina dalla strada, delineata sulla mappa, come illustrato in Figura 3.15.

Dunque, il movimento risulta svolto correttamente, ma non viene effettuato nell’area della mappa richiesta.

In quest’ultimo task, il percorso da seguire è illustrato sulla mappa ed è delimitato dalla presenza dei *Box Collider*, che consentono l’interazione con il *GameObject* macchina.



Figura 3.15. Feedback visivo relativo alla condizione di errore nel Task 4.

Performance di gioco e punteggi

Per il calcolo dei punteggi di gioco ottenuti dall'utente, vengono valutati i seguenti parametri:

- completamento del task;
- tempo impiegato per lo svolgimento del task;
- numero di oggetti collezionati nei Task 1, 2 e 3 (*egg*, *milk*, *cherry*);
- numero di oggetti persi nei Task 1 e 3 (*eggError*, *cherryError*);
- numero di uscite di strada avvenute nel Task 4 (*outOfRoad*).

Queste informazioni sono analizzate per ogni ordine effettuato, dunque, per ogni ripetizione del loop di gioco. Il calcolo delle performance di gioco, relativo ai Task 1, 2 e 3, è riportato nell'Equazione 3.15:

$$\text{score} = (\text{egg} + \text{milk} + \text{cherry}) \times 6 - (\text{eggError} + \text{cherryError}) \quad (3.15)$$

Introducendo anche i punteggi relativi al Task 4, si distinguono due diverse condizioni:

- task correttamente completato (ordine consegnato):

$$\text{score} = \text{score} + 50 - \text{outOfRoad} \times 5 \quad (3.16)$$

- altrimenti (ordine non consegnato):

$$\text{score} = \text{score} - \text{outOfRoad} \times 3 \quad (3.17)$$

Le performance di gioco all'interno della scena *Exergame* sono illustrate alla fine del loop di gioco, prima di cominciare un altro ordine, come mostrato in Figura 3.16.

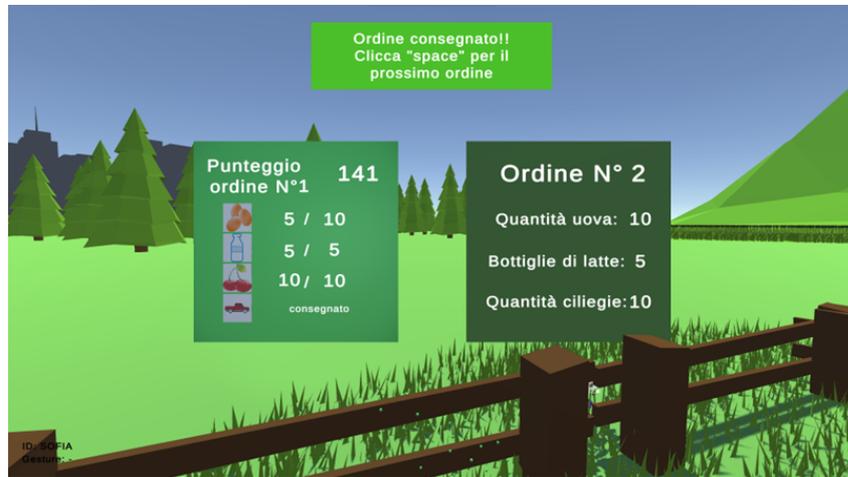


Figura 3.16. Performance riassuntive del loop di gioco.

3.2.8 Training

La fase di Training è stata sviluppata per consentire la comprensione delle interazioni di gioco, senza introdurre ulteriori componenti dell'ambiente circostante, distrazione o pressione sull'utente.

Inizialmente, vengono visualizzati tutti i movimenti della mano richiesti, come in Figura 3.17.



Figura 3.17. Gesture richieste nella fase di Training dell'exergame.

La struttura delle fasi del Training segue quella sviluppata per l'exergame, dunque le azioni richieste simulano quelle del gioco nella stessa sequenza. La differenza con la scena dedicata all'exergame consiste nell'assenza di un ambiente o contesto specifico, nella rimozione delle componenti di gioco e della valutazione dei punteggi, in modo da favorire la concentrazione dell'utente sulla richiesta specifica di movimento, previsto nel singolo task. Un esempio è riportato in Figura 3.18, in cui i modelli dei *GameObject* ciliegia e cestino sono stati sostituiti con elementi standard che non rispecchiano una specifica condizione della realtà.

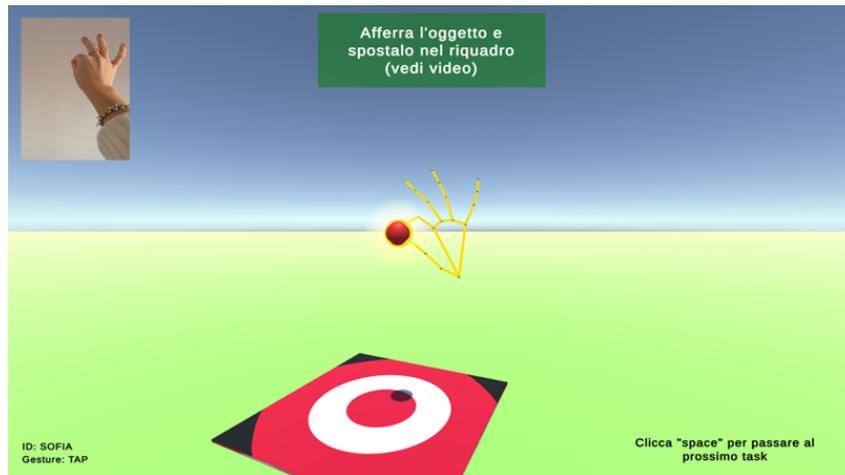


Figura 3.18. Fase di Training relativa alla presa digitale.

Nell'ultimo task (Task 4), corrispondente alla presa digitale continua, è stata sostituita la macchina con una penna, per non anticipare le componenti di gioco dell'exergame e favorire la comprensione del movimento richiesto. Infatti, in Figura 3.19 il movimento da svolgere simula il disegno, consentendo di focalizzarsi sulla gesture da eseguire, dal momento che la richiesta di gioco risulta essere chiara.

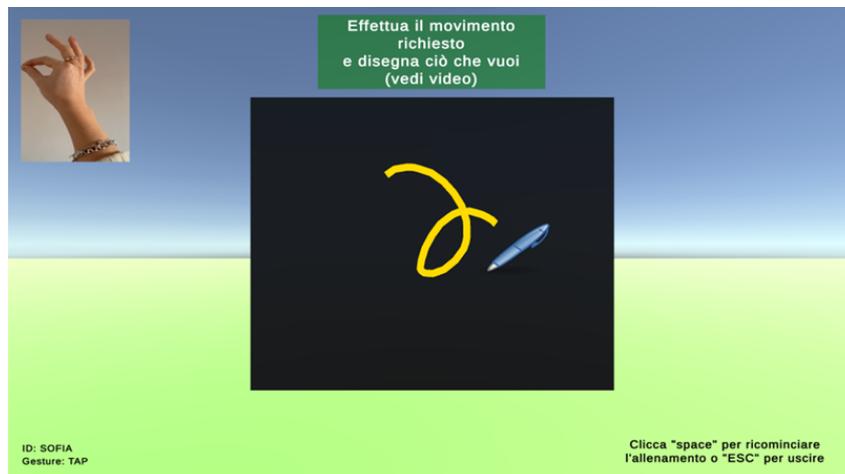


Figura 3.19. Fase di Training relativa alla presa digitale prolungata.

Anche nella fase di Training, in Task 1 e 3, è stata introdotta una soluzione visiva per favorire la percezione spaziale dell'utente e di conseguenza consentire la "presa" degli oggetti: l'*halo*, dettagliato nel Capitolo 4.1. Nell'exergame questo dettaglio visivo può aiutare l'utente a prestare attenzione ad elementi o interazioni di gioco, come, ad esempio, focalizzarsi maggiormente sull'oggetto evidenziato con l'*halo*, quando risulta essere stato toccato da almeno un landmark della mano (Figura 3.20).

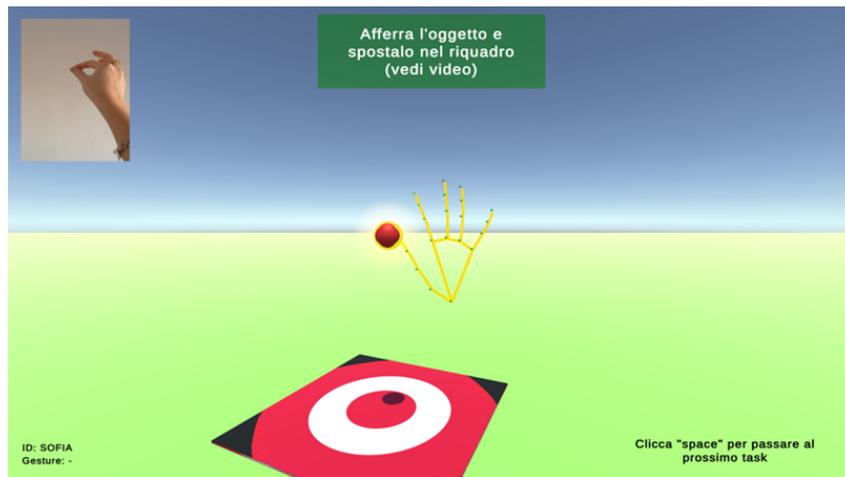


Figura 3.20. Esempio di applicazione dell'*halo* nella fase di Training.

Capitolo 4

Protocollo sperimentale

4.1 Valutazione Usabilità e UX

In questo capitolo, vengono esaminate le metodologie adottate per valutare l'usabilità e l'esperienza dell'utente complessiva durante l'utilizzo dell'exergame. E' essenziale considerare il contesto e l'obiettivo finale dell'exergame, rivolto ad una popolazione di utenti affetti dalla Malattia di Parkinson. Pertanto, la valutazione dell'usabilità è un passo fondamentale per migliorare il game design, successivamente per definire la destinazione d'uso dell'exergame e per eventuali sperimentazioni future.

Il procedimento seguito per quest'analisi si basa sui cardini principali dell'usabilità [27], già adottati in ulteriori studi in letteratura [8] [29]. Si vogliono valutare più funzionalità dell'interfaccia, esaminando i risultati ottenuti in termini di:

- *Learnability*, valutando la capacità di interagire con l'applicazione per la prima volta;
- *Efficiency*, che misura quanto gli utenti riescano a svolgere i task, dopo averne compreso le interazioni;
- *Memorability*, volta a valutare la facilità con cui gli utenti riescano a riacquisire una competenza, dopo un determinato periodo di inattività;
- *Errors*, analizzando il numero di errori commessi dall'utente nei vari task;
- *Satisfaction*, misura il grado complessivo di soddisfazione degli utenti nell'interazione con il sistema.

In particolare, focalizzarsi sulla capacità degli utenti di ricordare le interazioni del gioco può risultare utile per valutare la *Memorability* dell'exergame.

Le scelte progettuali sono state valutate e risultano essere determinanti fin dalla fase iniziale di progettazione dell'exergame, poiché influiscono sull'usabilità del sistema [8]. L'obiettivo è quello di rendere l'interfaccia utente il più chiara e coerente possibile, garantendo un'esperienza di gioco soddisfacente per gli utenti affetti dalla Malattia di Parkinson. La disposizione delle istruzioni e delle informazioni relative ai punteggi è stata organizzata seguendo un ordine semplice e comprensibile. Ad esempio, i video dimostrativi, le istruzioni e le informazioni relative ai punteggi sono posizionati in modo da adottare lo *Z pattern layout* [1], guidando l'occhio dell'utente dall'alto a sinistra verso il basso a destra, come indicato in Figura 4.1.



Figura 4.1. Disposizione dei popup informativi.

Questa disposizione facilita la comprensione e la fruizione del contenuto informativo, ordinato in base all'importanza dell'informazione che fornisce. Infatti, i video dimostrativi sono posizionati in alto a sinistra, in quanto in ordine di priorità risultano essere i più significativi al fine di comprendere la principale modalità di interazione di gioco. I video dimostrativi sono inseriti e disposti, come appena descritto, in tutte le sezioni dell'exergame (Calibrazione, Allenamento e Gioco), poiché costituiscono l'informazione più rilevante per lo svolgimento del movimento. In un exergame con finalità di riabilitazione e/o monitoraggio è di fondamentale importanza correggere e fornire un'indicazione sulla tipologia di movimento richiesta, sia per ridurre eventuali movimenti sbagliati, ma anche per fornire un supporto costante all'utente durante il gioco [9].

Nella fase di allenamento e nel gioco, è stato introdotto l'*halo* nei task che richiedevano di afferrare un oggetto, come in Figura 4.2.



Figura 4.2. Visualizzazione tecnica dell'*halo* per evidenziare un oggetto correttamente toccato.

L'*halo* è una tecnica visiva utilizzata nelle interfacce utente per evidenziare o circondare gli oggetti d'interesse e di conseguenza facilita la comprensione dei movimenti da svolgere e migliora la percezione spaziale dell'utente.

Nella scena dedicata alla fase di gioco, sono stati inseriti feedback visivi e sonori differenti, in funzione del task di gioco. Questa scelta è stata effettuata per valutare le varie tipologie di feedback più utili e rilevanti, in combinazione con la tipologia di richiesta di gioco. I feedback di errore sono stati ridotti al minimo per evitare di suscitare nell'utente emozioni negative legate ai risultati ottenuti o alle loro performance.

Inoltre, la scelta delle gesture della mano richieste si basa sulle linee guida e gli esercizi di riabilitazione motoria dedicati alla mano, effettuati durante le sessioni di riabilitazione tradizionale, in modo da mantenere una coerenza tra le richieste di gioco e le attività svolte dal paziente durante la sessione o comunque durante le attività di vita quotidiana [9].

A seguito della fase di sviluppo, durante la sperimentazione, è stata condotta la valutazione dell'usabilità del sistema, analizzando le performance di gioco e i risultati ottenuti dai questionari sottoposti. In particolare, è stato possibile valutare l'usabilità nella fase di testing dell'exergame, acquisendo i feedback degli utenti. Il protocollo sperimentale adottato nella sperimentazione è illustrato nel Capitolo 4.2. I risultati ottenuti sono discussi dettagliatamente nel Capitolo 5.1.

4.2 Descrizione del protocollo sperimentale

Il protocollo sperimentale adottato per la valutazione dell'usabilità del sistema è fondamentale per descrivere il processo standard e ripetibile con cui svolgere la sperimentazione ed ottenere dei risultati confrontabili.

La sperimentazione è stata condotta su due popolazioni di soggetti differenti: un gruppo di controllo composto da soggetti sani e uno di soggetti parkinsoniani. La sperimentazione ha previsto due prove, effettuate a distanza di almeno due settimane, per ogni soggetto. La prima prova è stata strutturata nei seguenti passaggi:

- arrivo del soggetto in laboratorio;
- lettura e firma del consenso informato, assegnazione di un ID progressivo ed univoco;
- spiegazione del progetto e degli obiettivi dell'esperimento;
- compilazione del questionario *Demografico* e del *Cognitive Failures Questionnaire* (CFQ);
- calibrazione e training dell'exergame sotto guida dell'operatore;
- esecuzione del gioco senza supervisione, effettuando il loop di gioco due volte (cioè il completamento di due ordini);
- compilazione del NASA TLX e del questionario di *User Experience v1* (UX1);

Dai risultati ottenuti e dai feedback degli utenti sono state individuate funzionalità da aggiornare e migliorare. Dopo il primo test, sono stati valutati i risultati dei questionari, in modo da introdurre la correzione degli errori e delle problematiche emerse durante la sessione di gioco.

Nella seconda prova non è stata invece effettuata la fase di Training. Questo approccio consente di valutare l'impatto dell'allenamento sull'esperienza dell'utente, confrontare le prestazioni tra la prima e la seconda prova e analizzare la memorizzazione dell'exergame, senza svolgere nuovamente l'allenamento.

Il protocollo sperimentale relativo alla seconda prova è uguale al primo e differisce per la tipologia di questionari sottoposti al termine della sessione di gioco, che sono stati i seguenti, oltre al NASA TLX:

- *System Usability Scale* (SUS);
- *User Experience v2* (UX2);

La scelta dei questionari è dettagliata nel Capitolo 4.3 e sono stati somministrati all'utente nell'ordine indicato, dopo aver svolto l'exergame.

L'obiettivo principale è stato effettuare una valutazione dell'usabilità del sistema, considerando le interazioni degli utenti con l'interfaccia e le prestazioni nel completamento delle attività assegnate. La sperimentazione si è articolata in due fasi per testare i principi cardine dell'usabilità del gioco e per valutare i risultati attesi in termini di apprendimento e facilità d'uso nel tempo.

4.3 Questionari

Durante la sperimentazione, sono stati impiegati vari questionari per raccogliere feedback dettagliati sull'esperienza complessiva di gioco ed effettuare un'analisi dello stato cognitivo dei partecipanti. I questionari proposti sono volti a valutare la percezione soggettiva del carico di lavoro associato allo svolgimento dell'exergame, l'esperienza complessiva dell'utente e l'usabilità.

A ciascun partecipante è stato somministrato un questionario *Demografico*, contenente una serie di domande mirate a raccogliere informazioni demografiche sul profilo dei partecipanti. Le domande includono l'anno di nascita, il genere, il livello di scolarizzazione e la mano dominante dell'individuo, utilizzata poi durante la sperimentazione.

Per tenere conto del grado di compromissione a livello cognitivo dei partecipanti, è stato sottoposto il CFQ [7], un questionario standardizzato progettato per valutare la percezione dei partecipanti riguardo alle proprie capacità cognitive in situazioni specifiche. Il CFQ è uno strumento psicometrico progettato per valutare la frequenza con cui un individuo sperimenta nella vita quotidiana situazioni o episodi che coinvolgono errori di percezione, nella memoria o nel funzionamento motorio. È possibile estrarre un punteggio complessivo per valutare le 25 domande proposte, sommando le risposte ottenute (valori compresi tra 0 e 4) e ottenendo un range di valori tra 0 a 100.

Il NASA TLX [16] è stato invece impiegato per valutare il carico di lavoro associato allo svolgimento di compiti specifici con sistemi di interfaccia uomo-macchina. Nel contesto della valutazione dell'exergame, è stato utilizzato per valutare le richieste di gioco. Il NASA TLX si basa su una valutazione multidimensionale, in termini di:

1. Sforzo mentale: l'impegno cognitivo richiesto dai vari task;
2. Sforzo fisico: lo sforzo fisico richiesto;
3. Fretta: la pressione avvertita nello svolgimento delle attività;
4. Performance: quanto l'individuo ritiene di aver eseguito correttamente le richieste;
5. Impegno: quanto è stata necessaria la combinazione tra sforzo mentale e fisico per completare il compito.

6. Frustrazione: il livello di insoddisfazione o stress associato al compito.

E' richiesto ai partecipanti di valutare ciascun fattore, indicando quanto è stato determinante durante l'attività di gioco. I punteggi sono stati successivamente ponderati e combinati per ottenere un punteggio complessivo del carico di lavoro per ogni gruppo di studio. Il NASA TLX fornisce uno strumento che consente di comprendere come i partecipanti abbiano percepito il carico di lavoro complessivo durante l'utilizzo dell'exergame.

Ai partecipanti è stato proposto inoltre un questionario di *User Experience* (UX1), appositamente progettato al fine di valutare l'esperienza complessiva dell'utente durante l'utilizzo del *FARM Exergame*. Il questionario si focalizza sui principi fondamentali dell'usabilità e richiede agli utenti di valutare soggettivamente diversi aspetti. Inizialmente, vengono raccolte informazioni generali sul livello di conoscenza e competenza tecnologica degli utenti, con particolare attenzione agli ambienti virtuali di gioco, al fine di comprendere meglio le competenze dei partecipanti. Successivamente, il questionario si incentra sulla facilità di interazione con il sistema, la chiarezza delle istruzioni fornite ed il coinvolgimento dell'utente. Alcune domande si concentrano sui feedback restituiti dal sistema e su quelli percepiti dall'utente. Ci si sofferma sulle difficoltà riscontrate durante ciascun task e sul gradimento complessivo dell'exergame. Viene richiesto all'utente di specificare le problematiche riscontrate nell'utilizzo dell'applicazione, distinguendo quelle legate ai problemi tecnici del gioco o a causa di altri fattori. I problemi tecnici riguardano il mancato rilevamento della mano da parte del sistema di tracking, un'errata classificazione del movimento effettuato o altro. D'altra parte, i fattori esterni possono essere molteplici e includono le condizioni ambientali durante l'utilizzo, dunque, possibili distrazioni, difficoltà nell'eseguire i movimenti richiesti o altri aspetti rilevanti.

Nella seconda prova, ai partecipanti è stato proposto un questionario di *User Experience* (UX2) simile a quello della prima prova, ma che si focalizza sulle prestazioni ottenute dall'utente e sulla valutazione delle modifiche e dei miglioramenti introdotti nell'exergame, dopo la prima prova.

Infine, nella seconda prova, viene proposto il SUS, uno strumento standardizzato per misurare la percezione dell'usabilità di un sistema [18]. È composto da una serie di domande da valutare su una scala da 1 a 5, in base al grado di accordo o disaccordo con ciascuna affermazione. Le domande sono progettate per valutare diversi aspetti dell'usabilità, tra cui la facilità d'uso, la facilità di apprendimento e la soddisfazione complessiva dell'utente con il sistema. Il SUS è noto per la sua semplicità d'uso e la sua efficacia nel fornire un'indicazione rapida e affidabile dell'usabilità di un sistema. Il punteggio complessivo del SUS, compreso tra 0 e 100, viene calcolato combinando le valutazioni delle singole domande e indica il livello di usabilità percepito da parte dell'utente [18].

I risultati relativi ai questionari, combinati con le performance ottenute da ciascun soggetto, sono riportati e discussi nel Capitolo 5.

Capitolo 5

Risultati della sperimentazione

5.1 Risultati e discussione

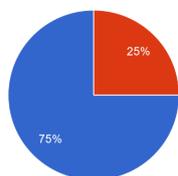
In questa sezione sono presentati i risultati ottenuti attraverso il protocollo adottato per l'esperimento. Verranno esaminati i dati raccolti durante la sperimentazione, al fine di valutare l'usabilità e l'esperienza dell'utente nell'utilizzo dell'exergame.

I risultati sono presentati distinguendo quelli relativi alla popolazione parkinsoniana da quelli del gruppo di controllo.

Valutazione del questionario Demografico

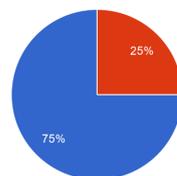
Il gruppo dei partecipanti sani è composto da 16 soggetti, mentre quello dei parkinsoniani è formato da 8 soggetti. L'età media (\pm deviazione standard) del gruppo di controllo è di 37 anni (± 16.9), mentre quella del gruppo dei parkinsoniani è 74 anni (± 8.2). Dai grafici relativi al questionario *Demografico* in Figura 5.1 e 5.2 si osservano le informazioni sul genere dei partecipanti, appartenenti ai due gruppi di studio.

Genere:
16 risposte



● Maschio
● Femmina

Genere:
8 risposte



● Maschio
● Femmina

Figura 5.1. Genere dei partecipanti del gruppo di controllo.

Figura 5.2. Genere dei partecipanti del gruppo dei parkinsoniani.

Il livello di scolarizzazione del gruppo di controllo è composto da: 81.2% Laurea e 18.8% Diploma. Per il gruppo relativo ai parkinsoniani, il livello di scolarizzazione è riportato in Figura 5.3.

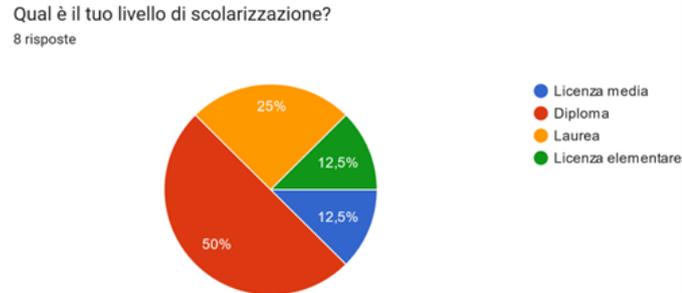


Figura 5.3. Livello di scolarizzazione del gruppo dei parkinsoniani.

Osservando le informazioni ottenute dal questionario Demografico, emergono differenze tra i due gruppi di studio nell'età media e nel livello di scolarizzazione. Questi dati possono influire sul livello di conoscenza della tecnologia ed esperienza negli ambienti virtuali di gioco e, di conseguenza, implicano prestazioni di gioco e UX differenti.

Durante la sperimentazione, un partecipante appartenente al gruppo relativo ai parkinsoniani si è ritirato per motivi indipendenti dall'esperimento. Dunque, nella seconda prova, la numerosità del gruppo dei parkinsoniani è pari a 7. Ai partecipanti del gruppo dei parkinsoniani è stata confermata una diagnosi di Malattia di Parkinson da circa 6 ± 3.5 anni (media \pm deviazione standard). Essi svolgono regolarmente un percorso di ginnastica adattata presso l'*Associazione Amici Parkinsoniani Piemonte Onlus*, che ha consentito questa sperimentazione.

I partecipanti della sperimentazione sono tutti volontari. In particolare, per i soggetti appartenenti al gruppo dei parkinsoniani, le sessioni di prova dell'exergame sono state condotte sotto la supervisione della terapeuta responsabile delle attività di ginnastica adattata.

Valutazione del Cognitive Failures Questionnaire

I risultati ottenuti relativi al CFQ per ciascun gruppo di studio sono illustrati nella Tabella 5.1.

Punteggio - Cognitive Failures Questionnaire (CFQ)	
Gruppo di studio	Valor medio (\pm deviazione standard)
Controllo	38.8(\pm 8.5)
Parkinsoniani	36.5(\pm 14.1)

Tabella 5.1. Tabella relativa al punteggio medio ottenuto (\pm deviazione standard) al questionario CFQ.

Il parametro riportato rappresenta il valor medio calcolato sui punteggi ottenuti per ogni partecipante del gruppo in analisi. La Tabella 5.1 mostra punteggi simili per i due gruppi di studio, con un punteggio medio leggermente più basso (ma con maggiore variabilità intra-gruppo) per i soggetti parkinsoniani. Questo risultato si può attribuire ad una minor capacità di autovalutazione del livello di *failure* cognitivo da parte dei parkinsoniani, con conseguente sottostima della condizione patologica percepita. E' importante infatti considerare che il CFQ è pensato per un'autovalutazione delle esperienze di *failure*, dal punto di vista cognitivo, nella vita quotidiana, e viene generalmente abbinato ad altri strumenti di valutazione clinica della funzione cognitiva.

Valutazione del questionario NASA Task Load Index

I risultati relativi al NASA TLX sono stati ottenuti tramite il metodo standardizzato [16] e sono riportati nella Tabella 5.2 per la prima prova, e nella Tabella 5.3 per la seconda.

Gruppo di controllo		
Prima prova		
	Weighted	Raw/Unweighted
	Results	Results
Overall	41.92	36.46
Diagnostic Subscores		
Mental	97.92	43.00
Physical	157.50	48.75
Temporal	108.33	38.33
Performance	116.00	30.67
Effort	154.38	46.56
Frustration	101.00	26.82
Gruppo di parkinsoniani		
Prima prova		
	Weighted	Raw/Unweighted
	Results	Results
Overall	45.88	40.73
Diagnostic Subscores		
Mental	134.29	50.63
Physical	141.25	55.00
Temporal	110.00	45.00
Performance	143.13	45.63
Effort	163.13	38.13
Frustration	52.50	26.67

Tabella 5.2. Risultati NASA TLX della prima prova condotta su entrambe le popolazioni.

Dal confronto dei risultati ottenuti dal NASA TLX durante la prima prova, si possono evidenziare le differenze emerse nei livelli di carico di lavoro percepiti dai due gruppi di studio. Nel gruppo dei parkinsoniani, il valore ottenuto della media pesata risulta essere leggermente più elevato rispetto a quello del gruppo di controllo.

Questo risultato suggerisce che mediamente i parkinsoniani hanno percepito un carico di lavoro più elevato rispetto al gruppo di controllo. Nello specifico, analizzando i punteggi ottenuti in ogni categoria, emerge che il punteggio medio dei parkinsoniani è maggiore in quasi tutte le categorie rispetto al gruppo di controllo. Un'eccezione riguarda il punteggio relativo alla *Frustration*, che risulta essere decisamente più basso nel gruppo dei parkinsoniani. Questo può essere indicativo della capacità dei soggetti parkinsoniani di tollerare maggiormente la frustrazione o fattori che possano influenzare la loro percezione della frustrazione durante lo svolgimento dell'attività.

Pertanto, il target di utenti finali dell'exergame potrebbe essere costituito più plausibilmente dai soggetti parkinsoniani (caratterizzati da prestazioni e dinamiche più lente), piuttosto che dai soggetti sani, più giovani e maggiormente abituati ad altre tipologie di videogiochi (con una risposta più rapida alle diverse azioni di gioco). Per questo motivo, i sani potrebbero aver percepito maggiormente il contributo della frustrazione.

Nella seconda prova effettuata, i risultati del NASA TLX hanno rivelato valutazioni simili alla prima, come riportato nella Tabella 5.3.

Gruppo di controllo				
Seconda prova				
	Weighted	Percentage change (Weighted)	Raw/Unweighted	Percentage change (Raw)
Overall	42.00	-1.25%	35.16	-4.08%
Diagnostic Subscores				
Mental	67.69	-30.84%	35.67	-16.00%
Physical	198.13	+25.59%	50.31	+2.57%
Temporal	135.00	+24.37%	40.71	+6.83%
Performance	93.13	-19.64%	27.50	-10.55%
Effort	153.67	-0.33%	47.67	+2.52%
Frustration	153.75	+52.72%	23.85	-10.77%
Gruppo di parkinsoniani				
Seconda prova				
	Weighted	Percentage change (Weighted)	Raw/Unweighted	Percentage change (Raw)
Overall	50.62	+9.82%	43.81	+7.60%
Diagnostic Subscores				
Mental	177.86	+32.68%	56.43	+11.10%
Physical	147.86	+4.96%	56.43	+3.12%
Temporal	116.43	+6.11%	48.57	+8.77%
Performance	127.14	-11.16%	40.00	-13.14%
Effort	175.00	+7.22%	47.86	+26.73%
Frustration	105.00	+98.74%	15.83	-39.58%

Tabella 5.3. Risultati NASA TLX della seconda prova condotta su entrambe le popolazioni.

Dall'analisi dei risultati del NASA TLX ottenuti durante la seconda prova, si ha la conferma che i parkinsoniani percepiscono un carico di lavoro complessivamente maggiore rispetto al gruppo di controllo. Si osserva che i parkinsoniani abbiano registrato punteggi più elevati rispetto al gruppo di controllo. In particolare, i punteggi più alti sono stati ottenuti nei contributi di *Mental* ed *Effort*. Tale risultato potrebbe essere attribuito al fatto che, nella seconda prova, i soggetti devono ricordare come giocare (*Memorability*), e riscontrano presumibilmente maggiori difficoltà rispetto ai soggetti sani. Ciò sottolinea l'elevato contributo a livello cognitivo e fisico dei parkinsoniani, durante l'exergame.

Complessivamente, i risultati ottenuti per i sani sono coerenti e confrontabili nelle due prove sperimentali. La coerenza dei risultati nel gruppo di controllo indica che i partecipanti sani hanno affrontato le attività dell'exergame in modo simile e prevedibile durante le prove sperimentali. Inoltre, emerge la loro capacità di autovalutazione nel tempo, la stabilità delle loro prestazioni fisiche e dei risultati attesi. Il livello di *Frustration* maggiore per il gruppo di controllo può essere attribuito alla maggiore esperienza dei partecipanti in contesti di gioco o attività simili, che li rende, dunque, più attenti agli errori o alle sfide presentate nelle prove. Inoltre, il loro interesse per altre tipologie di videogiochi potrebbe influenzare la percezione delle attività proposte durante l'esperimento.

Valutazione del questionario User Experience v1

Per quanto riguarda i questionari di *User Experience*, sono riportati i dati relativi ai questionari UX1 e UX2, confrontando i risultati ottenuti per la popolazione sana e quella parkinsoniana. In particolare, sono mostrati i risultati relativi alla prima prova condotta su ciascun gruppo di studio. I valori illustrati sono stati calcolati come valor medio delle risposte fornite alle domande del questionario UX1.

Gli aspetti esaminati per la valutazione dell'usabilità, discussi nel Capitolo 4.3 sono riportati nei grafici seguenti.

La maggior parte dei soggetti del gruppo di controllo ha dichiarato di preferire il *mouse* ed il *touchscreen* come metodi di interazione con i dispositivi, mentre la popolazione parkinsoniana preferisce principalmente il *mouse*.

Dal questionario UX1, emergono il livello di conoscenza relativo alla tecnologia e la familiarità con gli ambienti di gioco virtuali da parte dei partecipanti (Figura 5.4).

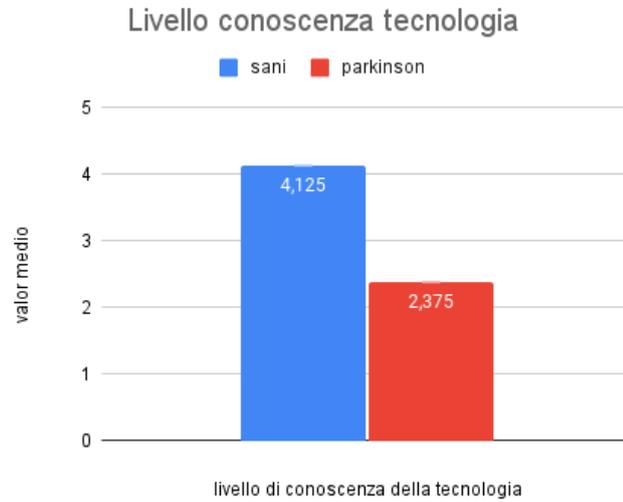


Figura 5.4. Livello conoscenza della tecnologia e ambienti di gioco virtuali.

La valutazione complessiva dell'exergame e quella relativa ai feedback di gioco sono riportate in Figura 5.5 e 5.6 per entrambe le popolazioni in analisi.

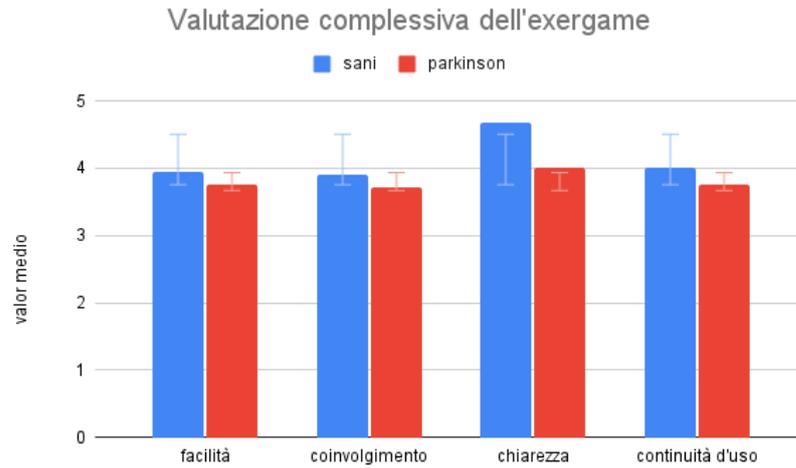


Figura 5.5. Valutazione complessiva dell'exergame - UX1.

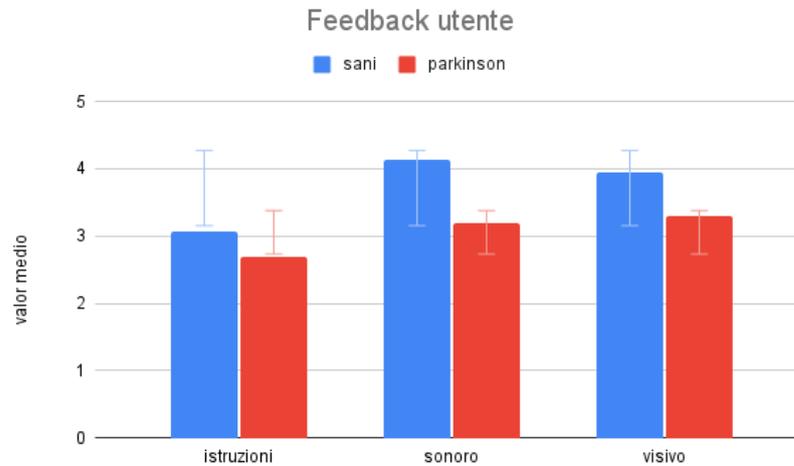


Figura 5.6. Valutazione dei feedback e delle istruzioni di gioco - UX1.

Complessivamente, l'exergame è stato valutato positivamente, in termini di comprensione, chiarezza, coinvolgimento e continuità d'uso, per entrambi i gruppi di studio. Anche i feedback, sia sonori che visivi, hanno ricevuto una valutazione positiva. Tuttavia, le istruzioni di gioco, intese come le indicazioni testuali all'interno della scena, hanno ricevuto una valutazione minore di 3 per il gruppo dei parkinsoniani.

In generale, i risultati relativi al gruppo dei parkinsoniani sono simili e confrontabili a quelli dei sani, ma leggermente minori. Infatti, a differenza del gruppo di controllo, i soggetti parkinsoniani hanno affermato una minore percezione della tabella dei punteggi nella scena e del suono associato alla raccolta di un oggetto. Questo potrebbe indicare un coinvolgimento maggiore da parte dei parkinsoniani nell'eseguire l'azione richiesta con una conseguente minore capacità di prestare attenzione a dettagli grafici secondari, al punto da non notare ulteriori stimoli o componenti. Per quanto riguarda l'utilizzo di ausili visivi, come l'*halo*, entrambi i gruppi hanno confermato l'utilità di questo strumento per comprendere come afferrare gli oggetti durante il gioco, migliorando la percezione spaziale nell'ambiente virtuale.

I risultati relativi alla valutazione dell'utilità della fase di allenamento sono riportati in Figura 5.7.



Figura 5.7. Valutazione della fase di allenamento - UX1.

Con questa analisi si vuole esaminare l'utilità della fase di Training, prevista per la prima prova della sperimentazione, per sostenere l'utente nella comprensione delle principali interazioni di gioco. Come mostrato dal grafico in Figura 5.7, la fase di allenamento è stata giudicata efficace (punteggio medio superiore a 4) da entrambi i gruppi.

Dal grafico in Figura 5.8, relativo all'autovalutazione dello svolgimento del secondo loop di gioco (ordine 2), si vuole osservare la capacità dei soggetti di percepire l'eventuale miglioramento delle loro prestazioni di gioco.

Successivamente, verrà valutata la coerenza delle risposte fornite con i risultati di performance ottenuti, riportati nella Tabella 5.10.

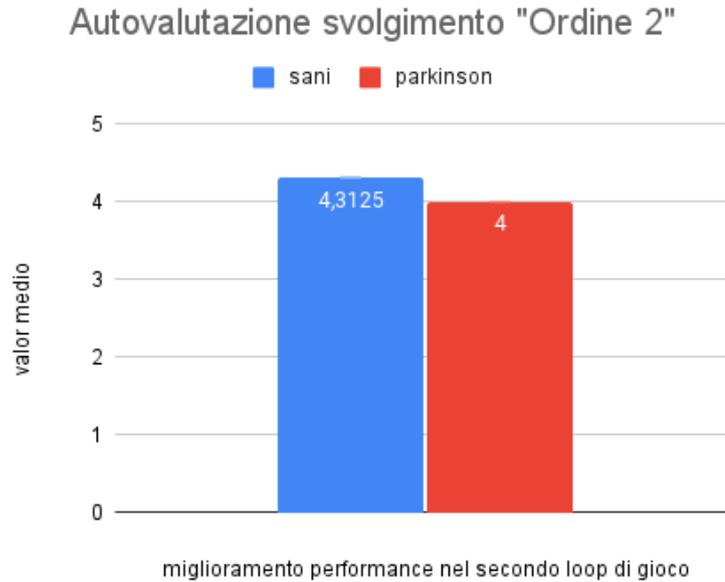


Figura 5.8. Autovalutazione svolgimento secondo loop di gioco (ordine 2) - UX1.

Complessivamente, entrambi i gruppi di studio hanno percepito un miglioramento nelle loro performance, nello svolgimento del secondo loop di gioco.

I principali problemi tecnici riscontrati dai partecipanti possono essere sintetizzati per i due gruppi di studio come riportato in Tabella 5.4. Per i soggetti appartenenti al gruppo di controllo, 4 partecipanti su 16 hanno affermato di aver effettuato il movimento correttamente, ma questo, in alcuni casi, non è stato classificato come previsto (misclassificazione della gesture). Il problema si è presentato maggiormente nel Task 3 (Raccolta delle ciliegie).

Nel gruppo dei parkinsoniani è stata rilevata come principale criticità la misclassificazione della gesture (2 partecipanti su 8). In particolare, sono state incontrate più difficoltà nel Task 4 (Consegna dell'ordine).

Problemi tecnici - prima prova			
Gruppo di studio	Problema tecnico	Numero soggetti	Task
Controllo	Misclassificazione gesture	4 di 16	Task 3
Parkinsoniani	Misclassificazione gesture	2 di 8	Task 4

Tabella 5.4. Principali problemi tecnici riscontrati dai partecipanti - UX1.

I problemi dovuti a fattori esterni (Tabella 5.5), indipendenti dall'exergame, possono essere ricondotti alla difficoltà nell'esecuzione del movimento richiesto.

Problemi per cause esterne - prima prova			
Gruppo di studio	Problema riscontrato	Numero soggetti	Task
Controllo	Difficoltà ad effettuare il movimento	6 di 16	Task 1
Parkinsoniani	Difficoltà ad effettuare il movimento	3 di 8	Task 4

Tabella 5.5. Principali problemi dovuti a fattori esterni riscontrati dai partecipanti - UX1.

La difficoltà riscontrata nell'effettuare il movimento conferma l'entità dei contributi relativi al carico di lavoro, ottenuti dal NASA TLX, per entrambe le popolazioni in esame.

La Tabella 5.6 presenta la valutazione complessiva dei task considerati più difficili e più facili, per le due popolazioni.

Valutazione dei task - prima prova		
Gruppo di studio	Task più facile	Task più difficile
Controllo	Task 2	Task 3
Parkinsoniani	Task 1	Nessuno

Tabella 5.6. Valutazione dei Task più facili e più difficili - UX1.

Nel gruppo di controllo, il Task 2 (Riempimento delle bottiglie) è stato valutato come il più facile, mentre il Task 3 (Raccolta delle ciliegie) è stato considerato il più difficile. Per quanto riguarda il gruppo di pazienti parkinsoniani, il Task 1 (Raccolta delle uova) è stato valutato come il più facile, mentre non è stato specificato nessun task come il più difficile, ad eccezione di due partecipanti che hanno riportato il Task 4 (Consegna dell'ordine).

I problemi tecnici più frequentemente riscontrati nel gruppo dei pazienti affetti dal Parkinson sono stati identificati soprattutto nel task che è risultato particolarmente difficile anche a causa di fattori esterni. Infatti, si sono evidenziate maggiori criticità nel Task 4, che richiede l'esecuzione prolungata del movimento di presa digitale. Pertanto, oltre alla necessità di effettuare un movimento che richiede una certa destrezza fine della mano, viene richiesto all'utente di mantenere il movimento

in modo continuo nel tempo, implicando un alto livello di concentrazione e coordinazione per rispettare i vincoli spaziali illustrati.

Nel Task 3, la misclassificazione delle gestive segnalata dai partecipanti può essere riconducibile piuttosto al fatto che i soggetti, per prendere l'oggetto richiesto, non si spostavano sufficientemente nello spazio, non favorendo conseguentemente la collisione tra i landmark della mano e l'oggetto. Dunque, è possibile che nell'inquadratura della *Main Camera* nel Task 3 non ci siano abbastanza elementi di gioco o dell'ambiente che possano consentire una percezione spaziale adeguata, che faciliti l'utente nell'interazione. Il problema segnalato, se fosse causato effettivamente da una misclassificazione delle gestive, si sarebbe presentato anche nel Task 4, in quanto basato sulla stessa soglia di calibrazione del Task 3.

Infine, i task considerati "più facili" per i sani ed i parkinsoniani sono rispettivamente il Task 2 ed il Task 1. Nel Task 2, si può affermare che i soggetti sani non abbiano riscontrato particolari difficoltà ed, inoltre, non essendo previsto alcun conteggio degli errori, questo potrebbe aver contribuito in una percezione del task come meno impegnativo.

Per i soggetti parkinsoniani la richiesta di gioco più facile è stata quella relativa al Task 1. E' possibile che i soggetti abbiano effettuato il movimento di presa palmare più facilmente rispetto alla intra-extra rotazione della mano (Task 2) o la presa digitale (Task 3, 4). Infatti, per soggetti fisicamente compromessi, la configurazione relativa alla mano "chiusa" è più semplice da effettuare rispetto ai movimenti fini, specifici del finger tapping, o rispetto all'intra-extra rotazione della mano, che richiede una maggior accuratezza del movimento.

Questi risultati forniscono una visione complessiva della differente percezione delle difficoltà tra i due gruppi, che può variare notevolmente in base allo stato cognitivo e motorio dei partecipanti.

In Figura 5.9 e 5.10 sono illustrati i risultati del questionario UX1 relativi alla valutazione dell'ambientazione di gioco (punteggio massimo pari a 5) ed il gradimento complessivo dell'esperienza con l'exergame (punteggio massimo pari a 10). I risultati ottenuti sono coerenti tra i due gruppi e simili tra loro. L'ambientazione dell'exergame in fattoria è stata apprezzata, confermando quanto riportato dagli studi presenti in letteratura.

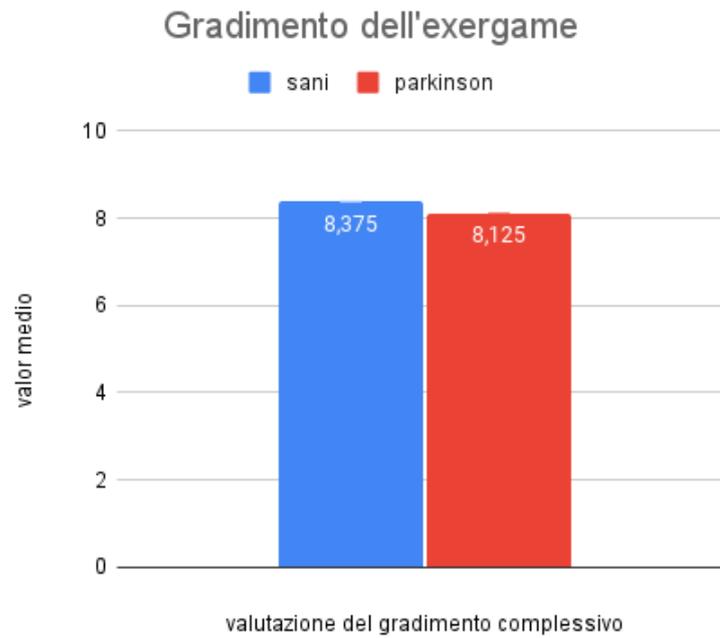


Figura 5.9. Gradimento complessivo dell'exergame - UX1.

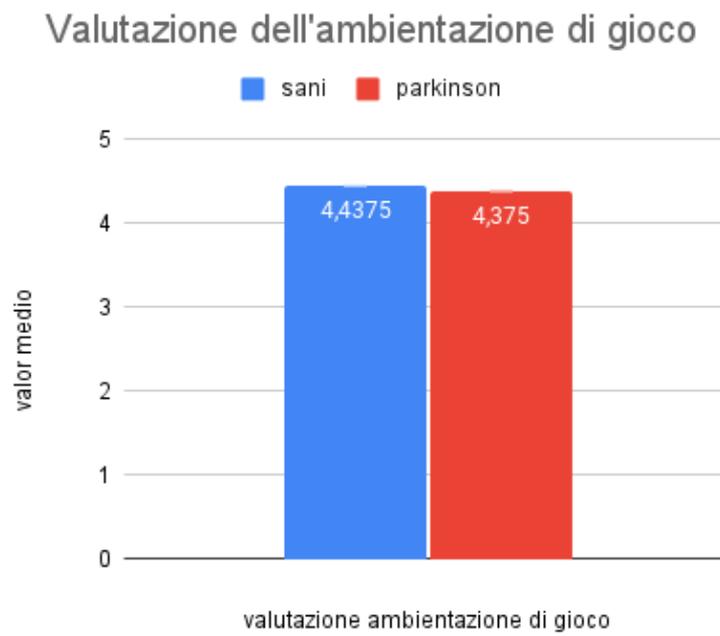


Figura 5.10. Gradimento dell'ambientazione di gioco: fattoria - UX1.

Valutazione del questionario User Experience v2

Per quanto riguarda la seconda prova, sono riportati i risultati relativi al questionario UX2 raggruppati in diverse categorie. In particolare, nella Figura 5.11 sono illustrate le valutazioni legate al coinvolgimento dell'utente, alla chiarezza e facilità di utilizzo dell'exergame ed infine quelle relative ai feedback inseriti.

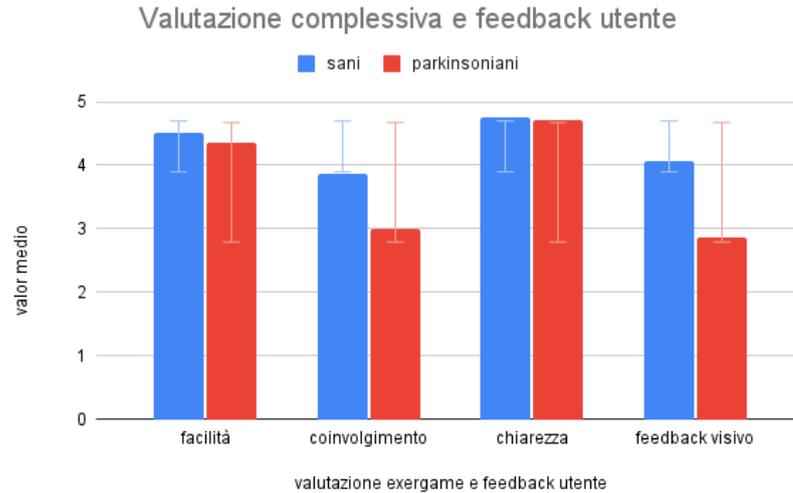


Figura 5.11. Valutazione complessiva dell'exergame e dei feedback inseriti - UX2.

Infatti, tra la prima prova condotta sui sani e quella condotta sul gruppo dei soggetti parkinsoniani, è stata inserita una tabella di riepilogo punteggi in modo da rendere l'esperienza di gioco dell'utente più coinvolgente e stimolante, mostrando a video gli oggetti collezionati in ogni task e il punteggio ottenuto. Dunque, nella seconda prova, è stato richiesto agli utenti di valutare questo nuovo elemento. Nella Figura 5.12 sono presentate le risposte fornite dagli utenti in relazione alle loro performance di gioco durante la seconda prova. Dal momento che in questa sessione non è prevista la fase di allenamento, viene richiesto all'utente di valutare:

- la sua prestazione senza aver eseguito la fase di allenamento;
- quanto pensa di essere stato più efficace nello svolgimento del secondo loop di gioco (ordine 2);
- la sua prestazione complessiva relativa a questa seconda prova (effettuata a distanza di due settimane dalla prima).

La sperimentazione, infatti, consta di due prove per testare la *Memorability* dell'exergame e valutare i risultati ottenuti in termini di apprendimento e facilità d'uso nel tempo. Dunque, è fondamentale osservare come i partecipanti abbiano

svolto l'exergame a distanza di un certo periodo di tempo. I risultati relativi alla *Memorability* sono presentati unitamente alle performance di gioco ottenute nelle due prove e verranno dettagliati successivamente in questo capitolo.

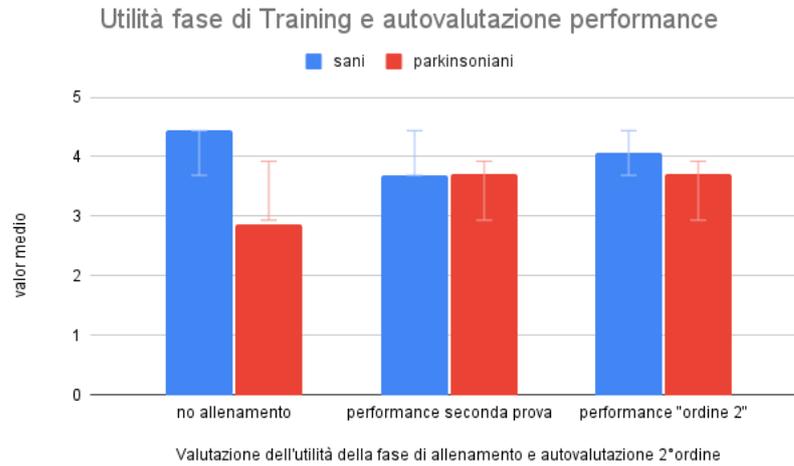


Figura 5.12. Valutazione dell'utilità della fase di allenamento e autovalutazione delle performance nella seconda prova e nel secondo ordine - UX2.

Dai risultati riportati nella Figura 5.12, si evince un miglioramento delle performance percepito dai partecipanti sia durante la seconda prova che nel secondo ciclo di gioco (ordine 2) di quest'ultima prova. Inoltre, la mancanza della fase di allenamento non è stata considerata un fattore determinante per portare a termine con successo la seconda prova dell'exergame.

L'obiettivo principale è effettuare una valutazione dell'usabilità del sistema, considerando le interazioni degli utenti con l'interfaccia e le prestazioni nel completamento delle attività proposte. Sono riportati i problemi tecnici e quelli dovuti a fattori esterni, rispettivamente nella Tabella 5.7 e 5.8 per i due gruppi in analisi.

Problemi tecnici - seconda prova			
Gruppo di studio	Problema tecnico	Numero soggetti	Task
Controllo	Misclassificazione gesture	4 di 16	Task 3
Parkinsoniani	Misclassificazione gesture	2 di 7	Task 3

Tabella 5.7. Principali problemi tecnici riscontrati dai partecipanti - UX2.

Problemi per cause esterne - seconda prova			
Gruppo di studio	Problema riscontrato	Numero soggetti	Task
Controllo	Difficoltà ad effettuare il movimento	2 di 16	Task 1 e 2
Parkinsoniani	Difficoltà ad effettuare il movimento	3 di 7	Nessuno

Tabella 5.8. Principali problemi dovuti a fattori esterni riscontrati dai partecipanti - UX2.

Per quanto riguarda il gruppo di parkinsoniani non si evince un miglioramento dei risultati, ma il task reputato più problematico dal punto di vista tecnico è il Task 3 e non più il Task 4, come per la prima prova. Dai risultati ottenuti nella seconda prova, emerge una riduzione delle problematiche riscontrate dalla popolazione sana, riferite alla difficoltà nello svolgimento del movimento richiesto. Per i parkinsoniani, non emerge un task particolarmente problematico per quanto riguarda le cause esterne.

Questo dato può essere dovuto ad una scarsa capacità di autovalutazione dei soggetti parkinsoniani. Infatti, dai risultati ottenuti e dalla successiva valutazione del task più difficile nella Tabella 5.9, emerge che la richiesta di gioco risultata più complicata per i parkinsoniani è quella relativa al Task 3. Il risultato di questa seconda prova per i parkinsoniani si allinea con la risposta fornita dal gruppo di controllo, suggerendo che il Task 3 sia quello più problematico dal punto di vista dell'usabilità.

Inoltre, dai problemi dovuti a fattori esterni indicati dal gruppo di controllo, si possono individuare il Task 1 ed il Task 2 come i più problematici. Questo dato può indicare che parte della popolazione sana possa aver sottovalutato la complessità ed il livello di impegno richiesto dai task, in quanto già a conoscenza della dinamica di gioco.

Valutazione dei task - seconda prova		
Gruppo di studio	Task più facile	Task più difficile
Controllo	Task 2	Task 3
Parkinsoniani	Task 1	Task 3

Tabella 5.9. Valutazione dei Task più facili e più difficili - UX2.

Complessivamente, il Task 3 si conferma nuovamente come il più impegnativo per entrambe le popolazioni coinvolte. Infatti, la presa digitale richiede una precisione

maggiore rispetto agli altri movimenti e questo aspetto può risultare fisicamente e cognitivamente impegnativo per l'utente, dato il livello di coordinazione richiesto. Pertanto, è possibile che la misclassificazione della gesture sia stata causata da una errata configurazione delle dita della mano, che impedisce il corretto riconoscimento dei landmark d'interesse.

La valutazione del Task 2 come il più semplice, da parte della maggioranza dei soggetti sani, conferma la specificità dei problemi riscontrati in questa richiesta di gioco. Ciò suggerisce che tali difficoltà siano legate più all'individuo che al compito stesso. Per quanto riguarda i parkinsoniani, il Task 1 si riconferma essere il più facile.

Il gradimento complessivo dell'exergame in Figura 5.13 è coerente con il risultato ottenuto per la prima prova (Figura 5.9). Ciò suggerisce una certa stabilità e corrispondenza nelle valutazioni effettuate da parte dei due gruppi.

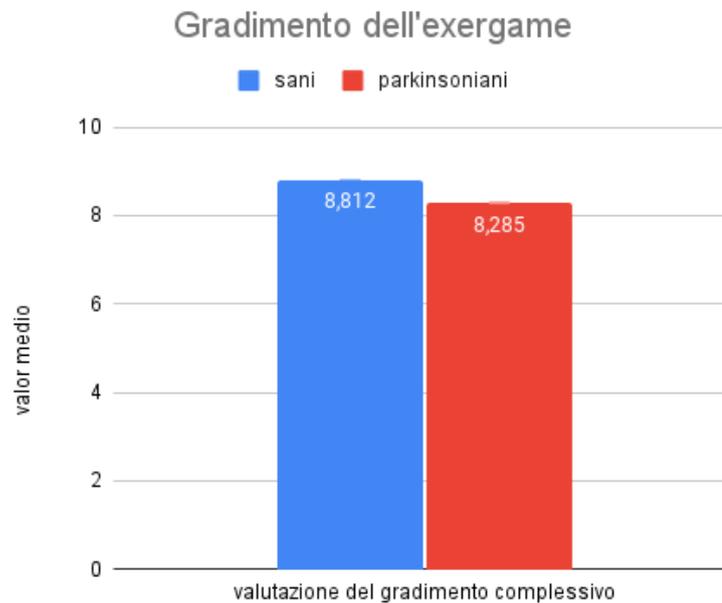


Figura 5.13. Gradimento complessivo dell'exergame - UX2.

Valutazione del System Usability Scale (SUS)

Infine, dall'ultimo questionario sottoposto (SUS), è stato ottenuto un punteggio pari a 78.43 relativo al gruppo di controllo e di 78.21 relativo al gruppo di parkinsoniani. I risultati del SUS per le due popolazioni sono praticamente equivalenti, suggerendo che entrambi i gruppi hanno valutato positivamente l'usabilità dell'exergame. Il valore ottenuto è stato normalizzato al fine di ottenere una posizione nella scala di usabilità del SUS [19], che colloca il sistema in un percentile, che esprime quanto quella applicazione risulti essere migliore in termini di usabilità rispetto ad altri sistemi. Dunque, si deduce una valutazione positiva dell'usabilità del sistema, in quanto per un punteggio di 78 al SUS si valuta l'usabilità dell'applicazione come superiore rispetto all'85% di altri sistemi testati [19]. Inoltre, la valutazione complessiva del SUS viene espressa attraverso una lettera, compresa tra "A" e "F", in funzione del punteggio ottenuto. La valutazione relativa all'exergame è "B", indicando un livello soddisfacente di usabilità per entrambe le categorie di utenti considerate.

Complessivamente, i dati raccolti mediante i questionari forniscono una valutazione dell'esperienza complessiva degli utenti durante l'utilizzo del sistema. Ciò consente di comprendere meglio le dinamiche e i fattori che influenzano l'interazione degli utenti con l'exergame, unitamente alla valutazione delle prestazioni di gioco.

Valutazione delle prestazioni di gioco

I dati relativi alla sessione di gioco prevedono una valutazione delle prestazioni degli utenti, in termini di performance ottenute. Per ogni utente, sono stati calcolati i tempi impiegati in ciascun task. Nella Tabella 5.10 sono riportati i tempi medi calcolati su ogni popolazione in analisi.

Tempo medio (secondi) per ogni task (\pm deviazione standard)				
Gruppo di controllo				
Prima prova				
	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4
Ordine 1	40.0 (\pm 16.2) s	16.7 (\pm 3.0) s	32.5 (\pm 11.0) s	11.5 (\pm 3.5) s
Ordine 2	34.2 (\pm 8.3) s	13.6 (\pm 1.6) s	27.5 (\pm 7.1) s	10.6 (\pm 3.8) s
Seconda prova				
	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4
Ordine 1	37.8 (\pm 10.0) s	16.2 (\pm 2.6) s	30.9 (\pm 13.0) s	10.0 (\pm 2.0) s
Ordine 2	30.4 (\pm 6.2) s	14.3 (\pm 2.1) s	27.4 (\pm 8.0) s	9.4 (\pm 2.2) s
Gruppo di parkinsoniani				
Prima prova				
	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4
Ordine 1	62.0 (\pm 25.0) s	42.4 (\pm 14.8) s	57.1 (\pm 25.6) s	34.6 (\pm 8.4) s
Ordine 2	52.7 (\pm 11.0) s	30.1 (\pm 9.0) s	39.1 (\pm 9.5) s	21.4 (\pm 16.7) s
Seconda prova				
	Task 1	Task 2	Task 3	Task 4
Ordine 1	49.7 (\pm 12.9) s	35.1 (\pm 14.1) s	57.6 (\pm 51.3) s	29.4 (\pm 23.1) s
Ordine 2	46.2 (\pm 10.0) s	26.3 (\pm 3.1) s	32.3 (\pm 6.9) s	14.2 (\pm 3.8) s

Tabella 5.10. Tempi medi impiegati per ogni task.

Dai risultati relativi ai tempi di svolgimento dei vari task è evidente la durata maggiore dei task nel gruppo dei parkinsoniani, rispetto al gruppo di controllo. In generale, però, entrambe le popolazioni mostrano la tendenza ad un miglioramento delle tempistiche tra lo svolgimento del primo ordine ed il secondo. Inoltre, è evidente una riduzione dei tempi medi nella seconda prova, rispetto alla prima. Questi risultati dimostrano l'efficacia dell'exergame in termini di *Learnability*, confermando la fattibilità di svolgimento dell'exergame a distanza di tempo.

In particolare, si osservano miglioramenti più consistenti nei risultati relativi ai parkinsoniani, con una riduzione dei tempi impiegati per ogni task tra la prima e la seconda prova. Questo risultato è determinato dalla maggiore familiarità e confidenza con l'exergame nella seconda prova, dal momento che i partecipanti hanno già potuto interagire con l'applicazione. Ciò suggerisce la possibilità che i partecipanti abbiano affrontato la seconda prova con più sicurezza, in quanto ricordavano le dinamiche principali e le modalità di gioco dalla prima prova.

Oltre ai tempi impiegati, è fondamentale considerare anche la valutazione degli errori compiuti durante l'utilizzo dell'exergame. La valutazione degli errori è stata introdotta durante la prima prova per il gruppo di parkinsoniani, ma non sulla prima prova relativa al gruppo di controllo. Nella prima prova con i sani, non sono stati introdotti feedback di errore nei vari task, in quanto il focus principale era l'aspetto motorio piuttosto che l'ottimizzazione dell'esperienza utente. Tuttavia, sono stati sviluppati e inseriti i meccanismi per monitorare gli errori successivamente alla prima prova sul gruppo dei sani, in base ai feedback e risultati della sperimentazione. Inoltre, nella seconda prova non è stata riscontrata una maggior frustrazione degli utenti, dunque, i feedback di errore non hanno influenzato negativamente la sessione di gioco. Gli errori ed i punteggi ottenuti (valori medi) sono riportati nella Tabella 5.11 per la seconda prova.

Score complessivo e numero di errori (\pm deviazione standard)				
Gruppo di controllo				
Seconda prova				
	Score	Errori Task 1	Errori Task 3	Errori Task 4
Ordine 1	199 (\pm 5.7)	1.1 (\pm 2.1)	1.3 (\pm 12.9)	0.4 (\pm 0.5)
Ordine 2	196 (\pm 12.0)	0.1 (\pm 0.2)	1.0 (\pm 8.0)	0.4 (\pm 0.6)
Gruppo di parkinsoniani				
Seconda prova				
	Score	Errori Task 1	Errori Task 3	Errori Task 4
Ordine 1	193 (\pm 7.7)	0.7 (\pm 1.4)	1.4 (\pm 1.2)	1.4 (\pm 1.3)
Ordine 2	198 (\pm 7.9)	1.0 (\pm 2.4)	1.4 (\pm 1.8)	1.0 (\pm 0.9)

Tabella 5.11. Valutazione degli errori commessi nei vari task per entrambi i gruppi di studio nella seconda prova.

Dai risultati relativi agli errori, emerge che i punteggi complessivi risultano maggiori per il gruppo di parkinsoniani rispetto al gruppo di controllo durante lo svolgimento del secondo loop di gioco (ordine 2). L'aumento degli score può essere attribuito al fatto che i partecipanti parkinsoniani abbiano preso più oggetti di quelli richiesti durante l'esercizio, in quanto non hanno prestato attenzione alla richiesta di gioco (numero massimo di oggetti da collezionare), continuando a raccogliere ulteriori oggetti. Al contrario, i partecipanti sani, avendo percepito il feedback positivo di completamento della richiesta, non hanno continuato a svolgere l'azione, in attesa di passare al task successivo. Questa discrepanza nei punteggi può riflettere una differenza nell'attenzione e nella comprensione delle istruzioni tra i due gruppi durante l'esecuzione dell'exergame.

In generale, per evitare di attribuire un punteggio maggiore, si sarebbe potuto valutare di non assegnare alcun punto in più per gli oggetti collezionati oltre il numero massimo richiesto, in modo da dare un peso alle azioni svolte dal soggetto.

Complessivamente gli errori commessi nell'ordine 2 sono minori rispetto all'ordine 1 e, in generale, non è stato commesso un numero significativo di errori. Nel caso del gruppo dei parkinsoniani, gli errori commessi sono incrementati per il secondo ordine. Analizzando i dati relativi ad ogni paziente, e dunque non gli errori medi complessivi, emerge che uno specifico partecipante del gruppo ha commesso tutti gli errori relativi al Task 1 nel secondo ordine e la maggior parte degli errori relativi al Task 3, sempre del secondo ordine. Questo suggerisce che tale soggetto potrebbe aver avuto difficoltà particolari nel comprendere le istruzioni o nel mantenere la concentrazione e le prestazioni richieste durante gli specifici task, peggiorando i risultati complessivi. Inoltre, anche in funzione del suo stato di salute al momento della prova (e terapia), potrebbe aver percepito un carico complessivo di lavoro maggiore ed un significativo affaticamento o livello di stress elevato.

In generale, è fondamentale considerare che questi risultati potrebbero essere influenzati da fattori individuali, come le capacità cognitive, l'attenzione e la familiarità con i videogiochi, oltre ai fattori esterni, quali distrazioni, lo stato emotivo o la fatica durante l'esecuzione del compito.

Complessivamente, dall'analisi dei dati relativi alle performance ottenute e dalle risposte fornite nel questionario UX2, l'exergame risulta efficace dal punto di vista della *Memorability* del gioco, dimostrando la possibilità da parte di una vasta gamma di utenti di riuscire a memorizzare le interazioni di gioco. Tuttavia, è stato individuato da parte della popolazione parkinsoniana un maggior contributo dal punto di vista dell'impegno e del carico di lavoro mentale rispetto ai sani, ma nonostante questo aspetto i risultati di performance sono migliorati per entrambi i gruppi di studio.

Valutazione dei grafici di calibrazione

Infine, per ogni partecipante nel database sono stati memorizzati i grafici relativi alle soglie calcolate in fase di calibrazione, dettagliata nella Sezione 3.2.6. In Figura 5.14, 5.15 e 5.16 vengono rappresentati gli andamenti delle distanze tra i landmark, relativi ad un soggetto appartenente al gruppo di controllo e quelli di un soggetto parkinsoniano, confrontati in funzione della gesture in analisi.

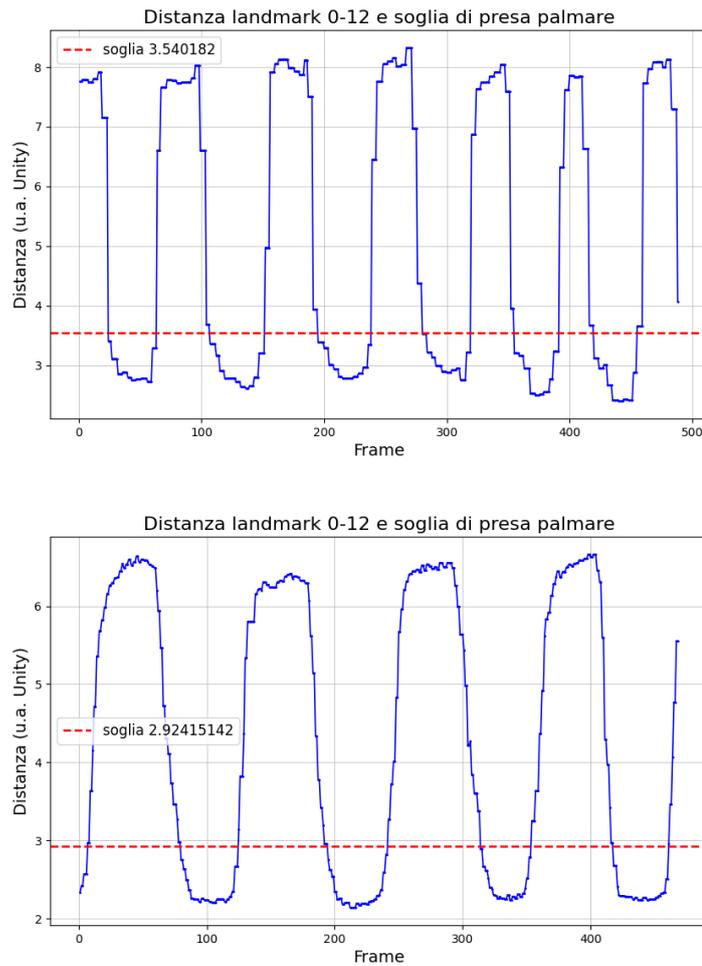


Figura 5.14. Presa palmare rispettivamente di un soggetto sano e di un soggetto parkinsoniano.

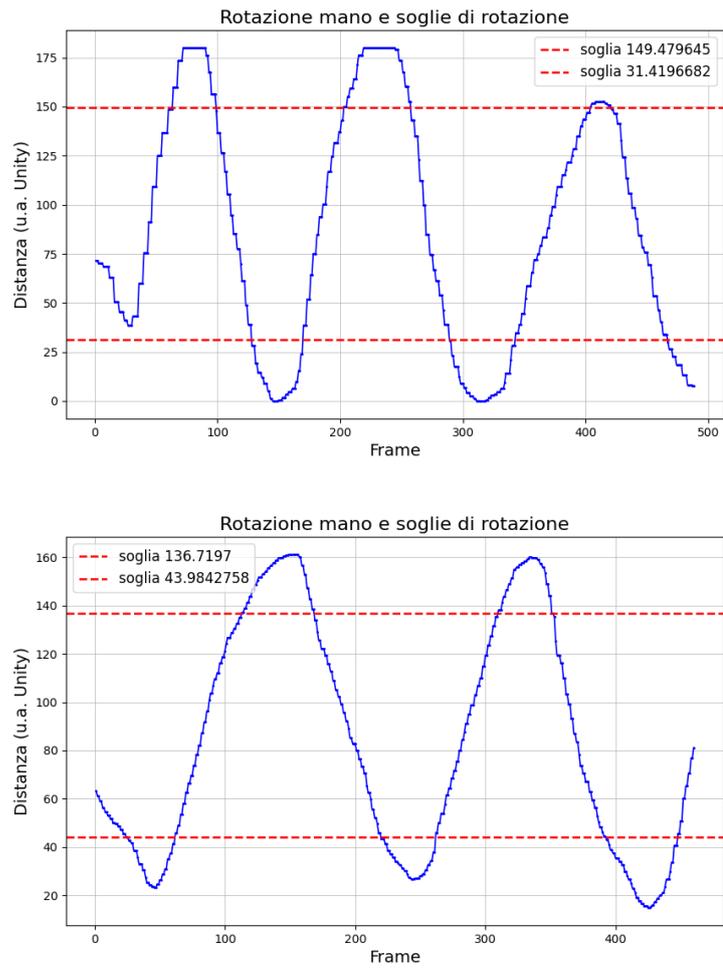


Figura 5.15. Intra-extra rotazione mano rispettivamente di un soggetto sano e di un soggetto parkinsoniano.

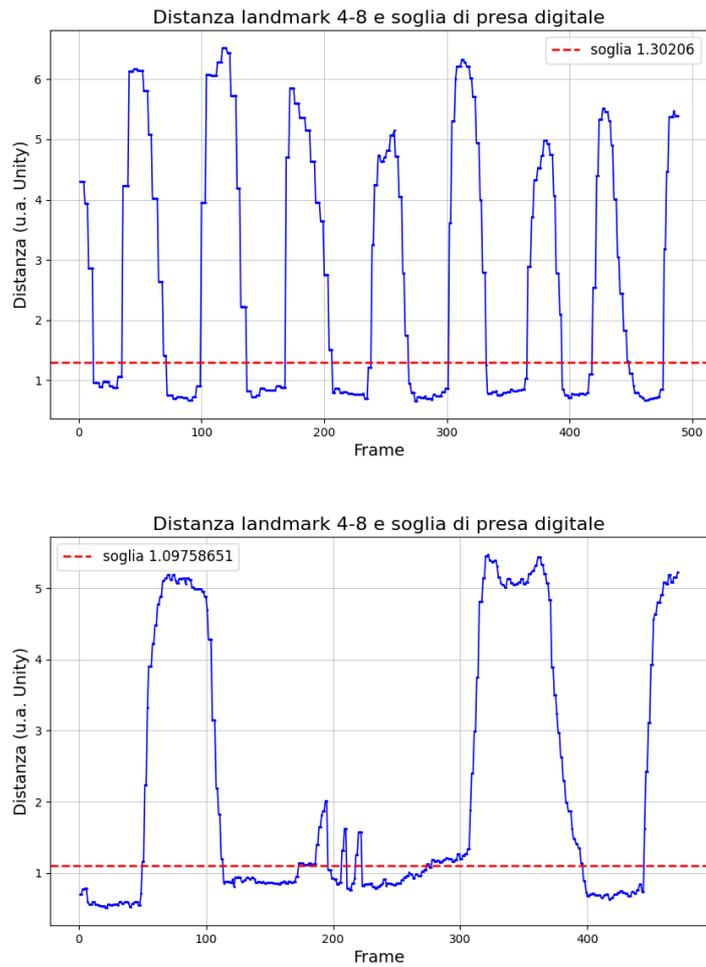


Figura 5.16. Presa digitale rispettivamente di un soggetto sano e di un soggetto parkinsoniano.

Dai grafici emerge la differente abilità motoria dei soggetti parkinsoniani rispetto a quella del gruppo di controllo. In particolare, i partecipanti affetti da Malattia di Parkinson hanno mostrato una ridotta velocità e ampiezza nel riprodurre i movimenti rispetto al gruppo di controllo. Inoltre, l'accuratezza nel compiere i movimenti è risultata ridotta nel gruppo dei parkinsoniani, sottolineando la difficoltà riscontrata nel controllo motorio fine e coordinato.

I comportamenti motori osservati nei soggetti parkinsoniani durante la fase di calibrazione iniziale sono riconducibili alla tipica sintomatologia della Malattia di Parkinson, caratterizzata da una generale lentezza dei movimenti (bradicinesia) accompagnata da una ridotta mobilità (ipocinesia, movimenti di ampiezza ridotta o incompleti). Inoltre, in alcuni soggetti, è stata riscontrata la tendenza dei pazienti a bloccarsi inizialmente dopo aver cominciato il movimento volontario, seguito poi dalla continuazione del movimento. Anche questo comportamento motorio è riconducibile alla sintomatologia della Malattia di Parkinson, che si manifesta in alcune condizioni con evidenti interruzioni di movimento (*freezing* o blocco motorio) oppure esitazioni nell'iniziare o nel proseguire il movimento.

Questi grafici, ottenuti a partire dalla distanza misurata tra i landmark di riferimento per lo specifico movimento, forniscono una indicazione immediata ed intuitiva della capacità motoria della mano, permettendo ad un osservatore (medico, terapeuta) di rilevare eventuali anomalie durante l'esecuzione libera dei tre movimenti fondamentali (presa palmare, presa digitale e rotazione della mano), che sono alla base della valutazione clinica dei soggetti parkinsoniani, mediante la scala UPDRS [2]. Tuttavia, ancora più rilevante, è la possibilità di ricavare da queste traiettorie le misure oggettive, in termini di ampiezza, velocità, frequenza, che sono facilmente e quantitativamente monitorabili nel tempo e sono fondamentali per individuare alterazioni, dovute alla progressione della patologia.

Capitolo 6

Conclusioni

6.1 Conclusioni

Complessivamente, l'usabilità dell'exergame è stata valutata positivamente sia dalla popolazione parkinsoniana che dal gruppo di controllo.

Al fine di rendere l'exergame conforme agli standard e criteri predefiniti di usabilità [8] [29], sono state adottate linee guida che hanno consentito di ridurre il più possibile gli errori o problemi legati all'esperienza utente con l'exergame. L'approccio modulare, adottato nello sviluppo dei singoli task, ha favorito una maggiore flessibilità e facilitato le correzioni e gli aggiornamenti necessari. Questo metodo ha agevolato la gestione del codice, l'individuazione e la risoluzione dei problemi, riducendo il rischio di errori e semplificando il processo di sviluppo. Ogni task, infatti, viene gestito separatamente rispetto al resto dell'applicazione.

La tecnologia utilizzata, composta da una telecamera RGB, si è rivelata una alternativa promettente rispetto alle telecamere RGB-D. La stima della componente di profondità, effettuata dal metodo di Hand Tracking, non ha rappresentato un problema significativo nell'interazione con l'exergame, né ha compromesso la User Experience. Inoltre, questo approccio ha determinato un notevole risparmio in termini di costi, rispetto all'impiego di dispositivi dedicati, come Kinect o LMC. Infine, il sistema markerless ha consentito agli utenti maggior comfort durante l'esperienza di gioco, rispetto all'utilizzo di una tecnologia marker-based, non comportando alcun ingombro ed impedimento dovuto ai sensori.

La fase di calibrazione si è rivelata particolarmente utile, poiché personalizza le soglie di movimento per ciascun paziente, considerando le differenze individuali nella capacità motoria. Questa personalizzazione è fondamentale, in quanto il range di movimento differisce in base alla condizione motoria di ciascun paziente. Tuttavia, durante la calibrazione non è stata introdotta una funzionalità per valutare la posizione degli altri landmark della mano, al fine di comprendere la configurazione delle dita ed avviare ad eventuali problemi legati al riconoscimento dei landmark,

vincolato dalla tecnologia markerless adottata.

Inoltre, i problemi tecnici associati alle criticità del sistema sviluppato suggeriscono che la difficoltà nell'esecuzione dei movimenti, da parte di alcuni soggetti, abbia influenzato il corretto riconoscimento dei landmark, comportando, in alcuni casi, la misclassificazione delle gesture in questione. È importante sottolineare che l'errata classificazione delle gesture richieste non è necessariamente dovuta ad una calibrazione non corretta, ma piuttosto ai limiti che comporta questa tecnologia markerless. Infatti, se la posizione della mano non consente un riconoscimento accurato di tutti i landmark (occlusione), il sistema potrà solo stimare la posizione dei landmark nascosti, determinando una ridotta accuratezza del tracciamento.

La fase dedicata all'allenamento è stata complessivamente utile per comprendere come interagire con il sistema, ma non è risultata necessaria nella seconda prova. Infatti, nella seconda prova, nonostante il mancato svolgimento della fase di Training prima del gioco, l'esperienza complessiva e la capacità di interagire con l'exergame non è peggiorata. Si deduce da questo risultato che l'exergame risulta essere comprensibile anche senza fase di allenamento. Inoltre, emerge che i soggetti siano stati in grado di ricordare le interazioni principali dell'exergame (*Memorability*), tra la prima e la seconda prova (a distanza di due settimane), e dunque siano riusciti ad utilizzarlo nuovamente senza troppe difficoltà. Tuttavia, lo svolgimento della fase di Training risulta essere fondamentale con persone cognitivamente e/o fisicamente compromesse per allenarsi nell'interazione con gli elementi di gioco e familiarizzare con le dinamiche richieste.

Comunque, sono necessari ulteriori studi sull'interfaccia utente e, dunque, sui feedback forniti durante le sessioni di gioco, soprattutto in contesti riabilitativi. Monitorare attentamente le azioni degli utenti è fondamentale per correggere i movimenti errati e favorire un allenamento efficace e controllato durante l'utilizzo dell'exergame. Inoltre, è fondamentale ridurre al minimo i feedback legati alle penalità di gioco e piuttosto incentivare i feedback volti a correggere e guidare l'utente.

Nel contesto specifico dei soggetti parkinsoniani, l'aderenza dei movimenti richiesti dall'exergame a quelli utilizzati durante la valutazione clinica e nei protocolli di riabilitazione tradizionale ha contribuito a rendere l'interazione di gioco più comprensibile. L'ambientazione realistica del gioco e l'associazione dei compiti richiesti ad azioni concrete hanno, inoltre, agevolato gli utenti nello svolgimento dell'exergame, migliorando complessivamente l'esperienza di gioco.

Essendo stato progettato con scopi terapeutici, è essenziale valutare l'ottimale utilizzo dell'exergame al fine di garantire benefici significativi all'utente. Infatti, le osservazioni condotte, durante la discussione dei risultati, evidenziano l'importanza di una valutazione individuale dei partecipanti e delle loro prestazioni per comprendere a pieno le dinamiche che determinano gli errori e le difficoltà riscontrate durante l'esperimento.

L'uso dell'exergame, volto ad incentivare l'allenamento della mano nella Malattia

di Parkinson, ha il potenziale per migliorare la qualità di vita dei pazienti attraverso un approccio terapeutico innovativo, stimolante e personalizzato. Inoltre, consente ai pazienti di partecipare attivamente nel proprio percorso di riabilitazione, migliorando la coordinazione e la mobilità articolare, particolarmente utile nello svolgimento delle principali attività quotidiane.

Grazie alla portabilità dell'applicazione, gli utenti potrebbero svolgere gli esercizi da remoto, facilitando l'accessibilità alla riabilitazione. Questo strumento può consentire ai pazienti di integrare l'esercizio fisico più facilmente nella loro routine quotidiana, comportando una riduzione dei costi di riabilitazione e della tecnologia utilizzata. Infatti, l'utilizzo di una sola telecamera dedicata permette di ridurre notevolmente i costi legati alla strumentazione tecnologica da utilizzare, senza rinunciare ad un tracking della mano sufficientemente accurato e stabile.

Attraverso la combinazione dell'attività fisica con l'intrattenimento, l'exergame può contribuire a migliorare la qualità di vita dei pazienti, supportando il percorso di fisioterapia e riabilitazione. Infine, la struttura modulare dell'exergame favorisce l'integrazione e l'aggiunta di nuove funzionalità, consentendo di apportare facilmente modifiche in funzione delle esigenze degli utenti target.

6.2 Sviluppi futuri

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri dell'applicazione, sono state individuate possibili funzionalità da integrare nel sistema attuale, affinché si possa migliorare ulteriormente l'esperienza dell'utente e rendere il sistema più completo.

Per esempio, è fondamentale inserire un sistema di monitoraggio del movimento della mano, effettuando un controllo della posizione relativa tra i landmark, al fine di garantire una maggiore precisione e affidabilità nell'interazione con il gioco. Infatti, valutando la posizione relativa dei landmark non coinvolti nel calcolo delle soglie di calibrazione, è possibile individuare le configurazioni della mano che non consentono il corretto riconoscimento di ogni landmark, in quanto quella specifica parte della mano risulta non visibile dalla telecamera.

E' necessario, inoltre, perfezionare i feedback forniti durante il *gameplay*, in termini di chiarezza ed impatto visivo, per guidare efficacemente gli utenti durante la sessione di gioco e favorire la comprensione ed il coinvolgimento dell'utente ottimali. Inoltre, si può valutare di inserire una componente di errore anche nel Task 2, per valutare ulteriori aspetti legati alle performance di gioco dell'utente, precedentemente analizzate.

L'exergame è progettato per facilitare l'inserimento di nuove funzionalità o apportare modifiche alle interazioni esistenti. Ciò permette l'inserimento di ulteriori gesture, come la flessione-estensione della mano, per creare nuovi minigiochi e ampliare le possibilità di interazione. Ugualmente, è possibile introdurre diversi livelli di gioco e personalizzare l'esperienza utente in funzione di ogni specifico soggetto.

Uno degli obiettivi futuri di questa nuova tecnologia consiste nel rendere possibile l'utilizzo dell'exergame da remoto. Questa prospettiva include la capacità dell'utente finale di utilizzare il sistema in autonomia, direttamente nell'ambiente domestico, eventualmente sotto la supervisione di un caregiver.

Per perseguire questo obiettivo, è necessario considerare diversi aspetti. Ad esempio, è fondamentale sviluppare un sistema di autenticazione per garantire un accesso privato a tutti gli utenti. Inoltre, si potrebbe inserire l'utilizzo di un database basato su cloud per la gestione dei dati relativi alla calibrazione e alle performance di gioco. Dunque, si potrebbe considerare lo sviluppo di interfacce personalizzate e dedicate per diversi utenti, quali i pazienti, medici o fisioterapisti [8]. Questo consentirebbe di ottimizzare l'esperienza utente, fornendo funzionalità e informazioni specifiche all'operatore specializzato.

Inoltre, i task proposti dal *FARM Exergame* potrebbero risultare utili anche nella valutazione di altre patologie, diverse dalla Malattia di Parkinson, quali l'ictus, ed in particolare, il Task 4 può risultare utile per valutare tutte quelle condizioni che richiedono un recupero della destrezza o mobilità della mano oppure per contrastare il declino funzionale nella popolazione anziana. Una possibile evoluzione del Task 4 consiste nella richiesta di effettuare un disegno o scrivere, movimento utile per l'analisi della micrografia oppure di specifiche funzionalità cognitive.

Dal punto di vista del protocollo sperimentale, è necessario ed importante condurre una valutazione approfondita dello stato cognitivo dei partecipanti al fine di monitorare le loro capacità cognitive nel tempo ed ottenere un'analisi affidabile, che non sia eseguita dai partecipanti stessi. Introdurre strumenti di valutazione dello stato cognitivo, come il *Mini-Mental State Examination* (MMSE) [31], può consentire una personalizzazione mirata delle attività di gioco, adeguando il livello di complessità del gioco per ciascun soggetto. Inoltre, tramite la valutazione delle funzioni cognitive, è più facile ottenere un resoconto più affidabile riguardo ai problemi tecnici riscontrati e alle risposte fornite ai questionari.

Infine, l'introduzione di sensori per il monitoraggio dei parametri fisiologici può costituire uno strumento estremamente utile per la valutazione dello stato di attività e la condizione di salute dell'utente durante il *gameplay*. La combinazione di questo monitoraggio con il NASA TLX consente un'analisi accurata dell'esperienza complessiva dell'utente.

Dal punto di vista del coinvolgimento dell'utente, è possibile sfruttare la tecnologia della realtà virtuale, affinché l'esperienza di gioco risulti più immersiva, in quanto il monitoraggio del soggetto può indurre un peggioramento delle prestazioni e della mobilità [8]. Nel caso di un exergame volto ad incentivare il movimento della mano, è possibile effettuare le richieste di gioco in posizione seduta, con un conseguente livello di sicurezza elevato per i pazienti.

Attraverso l'utilizzo degli exergame, è dimostrato il maggior coinvolgimento del paziente, osservando il miglioramento delle funzioni cognitive e della qualità della vita di quest'ultimo. Dunque, sono necessarie ulteriori ricerche e valutazioni per

stabilire la frequenza di utilizzo dell'exergame, affinché questo strumento risulti efficace. Tuttavia, l'efficacia dipende anche da altri fattori, tra cui l'intensità e la durata delle sessioni di gioco, il livello di coinvolgimento dell'utente e le sue condizioni fisiche preesistenti.

I risultati complessivi ottenuti durante lo svolgimento di questa tesi dimostrano le potenzialità di queste nuove tecnologie e metodologie applicate in ambito sanitario, a supporto dei percorsi terapeutici tradizionali. I livelli di usabilità e di gradimento, ottenuti sul gruppo di soggetti parkinsoniani, confermano il loro interesse, coinvolgimento e partecipazione attiva nello sperimentare ed accettare questi nuovi strumenti nella loro quotidianità, stimolandone la funzionalità motoria con positivi effetti sul benessere psico-fisico e sulla qualità di vita generale.

Bibliografia

- [1] Bruce Hilliard et al. *Optimising Visual Layout for Training and Learning Technologies*. 2016.
- [2] Christopher G. Goetz et al. *The MDS-sponsored Revision of the Unified Parkinson's Disease Rating Scale*. 2008. URL: <https://www.movementdisorders.org/MDS/MDS-Rating-Scales/MDS-Unified-Parkinsons-Disease-Rating-Scale-MDS-UPDRS.htm>.
- [3] Natalie E. Allen et al. «An interactive videogame for arm and hand exercise in people with Parkinson's disease: A randomized controlled trial». In: *Parkinsonism & Related Disorders* 41 (2017), pp. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2017.05.011>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353802017301773>.
- [4] Gianluca Amprimo et al. «Assessment Tasks and Virtual Exergames for Remote Monitoring of Parkinson's Disease: An Integrated Approach Based on Azure Kinect». In: *Sensors* (2022). DOI: [10.3390/s22218173](https://doi.org/10.3390/s22218173). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8173>.
- [5] Gianluca Amprimo et al. *Hand tracking for clinical applications: validation of the Google MediaPipe Hand (GMH) and the depth-enhanced GMH-D frameworks*. 2023. arXiv: 2308.01088 [cs.CV].
- [6] Gillian Barry, Brook Galna e Lynn Rochester. «The role of exergaming in Parkinson's disease rehabilitation: a systematic review of the evidence». In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 11.1 (2014), p. 33. DOI: [10.1186/1743-0003-11-33](https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-33). URL: <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-33>.
- [7] D. E. Broadbent et al. «The Cognitive Failures Questionnaire (CFQ) and its correlates». In: *British Journal of Clinical Psychology* (1982).

- [8] L. Cardoso Mendes et al. «RehaBEElitation: the architecture and organization of a serious game to evaluate motor signs in Parkinson's disease». In: *PeerJ Computer Science* 9 (2023), e1267. DOI: 10.7717/peerj-cs.1267. URL: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1267>.
- [9] Manuela Chessa et al. «Effectiveness of Serious Games for Leap Motion on the Functionality of the Upper Limb in Parkinson's Disease: A Feasibility Study». In: *Computational Intelligence and Neuroscience* 2018 (2018), p. 7148427. DOI: 10.1155/2018/7148427. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/7148427>.
- [10] Yoo-Im Choi, Chiang-Soon Song e Byung-Yoon Chun. «Activities of daily living and manual hand dexterity in persons with idiopathic parkinson disease». In: *Journal of Physical Therapy Science* 29.3 (2017), pp. 457–460. DOI: 10.1589/jpts.29.457.
- [11] YoungSeok Choi e DeokJu Kim. «Effects of task-based LSVT-BIG intervention on hand function, activity of daily living, psychological function, and quality of life in Parkinson's disease: a randomized control trial». In: *Occupational Therapy International* 2022 (2022).
- [12] Veeral Desai, Arnav Gupta e Michael Wong. «Commentary: An interactive videogame for arm and hand exercise in people with Parkinson's disease: A randomized controlled trial». In: *Frontiers in Neuroscience* 12 (2018), p. 328.
- [13] Sajjad Farashi, Leila Kiani e Saeid Bashirian. «Effect of exercise on Parkinson's disease tremor: a meta-analysis study». In: *Tremor and other hyperkinetic movements (New York, N.Y.)* 11 (2021).
- [14] Pilar Fernández-González et al. «Leap motion controlled video game-based therapy for upper limb rehabilitation in patients with Parkinson's disease: a feasibility study». In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 16.1 (2019), p. 133. DOI: 10.1186/s12984-019-0593-x. URL: <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0593-x>.
- [15] Renilson Moraes Ferreira et al. «The effect of resistance training on the anxiety symptoms and quality of life in elderly people with Parkinson's disease: a randomized controlled trial». In: *Arquivos de neuro-psiquiatria* 76 (2018), pp. 499–506.
- [16] Hart Sandra G. «NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later». In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (2006). DOI: 10.1177/154193120605000909. URL: <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>.
- [17] Augusto Garcia-Agundez, Anna-Katharina Folkerts, Reiner Konrad et al. «Recent advances in rehabilitation for Parkinson's Disease with Exergames: A Systematic Review». In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 16.17 (2019). DOI: 10.1186/s12984-019-0492-1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12984-019-0492-1>.

-
- [18] Brooke John. «SUS: A quick and dirty usability scale». In: *Usability Evaluation in Industry* (1996).
- [19] Brooke John. «SUS: A Retrospective». In: *Journal of Usability Studies* (2013).
- [20] Michael J. Katchabaw et al. «Kinect-Based Exergames Tailored to Parkinson Patients». In: *International Journal of Computer Games Technology* 2018 (2018), p. 2618271. DOI: 10.1155/2018/2618271. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/2618271>.
- [21] Zoltána Keresztányi et al. «The relation of hand and arm configuration variances while tracking geometric figures in Parkinson’s disease: aspects for rehabilitation». In: *International Journal of Rehabilitation Research* 32.1 (2009), pp. 53–63. DOI: 10.1097/MRR.0b013e32830d369c.
- [22] Brian Kooiman e Dwayne D. Sheehan. «Exergaming Theories: A Literature Review». In: *IJGBL* 5.4 (2015), pp. 1–14. DOI: 10.4018/IJGBL.2015100101. URL: <http://doi.org/10.4018/IJGBL.2015100101>.
- [23] Sergio Machado et al. «Clinical applications of exercise in Parkinson’s disease: what we need to know?» In: *Expert Review of Neurotherapeutics* 22.9 (2022), pp. 771–780.
- [24] Sara Mateos-Toset et al. «Effects of a Single Hand–Exercise Session on Manual Dexterity and Strength in Persons with Parkinson Disease: A Randomized Controlled Trial». In: *PM&R* 8.2 (2016), pp. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2015.06.004>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1934148215002907>.
- [25] *MediaPipe*. URL: https://developers.google.com/mediapipe/solutions/vision/hand_landmarker.
- [26] Luanne Cardoso Mendes et al. «Objective Evaluation of Bradykinesia Using the RehaBEElitation Serious Game». In: (2022). DOI: 10.1109/COMPENG50184.2022.9905437.
- [27] Victor Nassar. «Common criteria for usability review». In: *Work* 41.Supplement 1 (2012), pp. 1053–1057.
- [28] *OpenCV*. URL: <https://opencv.org/>.
- [29] Michele Pirovano et al. «Exergaming and rehabilitation: A methodology for the design of effective and safe therapeutic exergames». In: *Entertainment Computing* (2016). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2015.10.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875952115000166>.
- [30] Guzsvinecz Tibor e Szucs Veronika et al. «Suitability of the Kinect Sensor and Leap Motion Controller—A Literature Review». In: *Sensors* (2019). DOI: 10.3390/s19051072.

- [31] Tom N Tombaugh e Nancy J McIntyre. «The mini-mental state examination: a comprehensive review». In: *Journal of the American Geriatrics Society* 40.9 (1992), pp. 922–935.
- [32] Tim Vanbellinggen et al. «Home based training for dexterity in Parkinson’s disease: a randomized controlled trial». In: *Parkinsonism & related disorders* 41 (2017), pp. 92–98.
- [33] Tian Wang et al. «Wuqinxi exercise improves hand dexterity in patients with Parkinson’s disease». In: *Evidence-based complementary and alternative medicine* (2020).

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti i volontari che hanno partecipato alla sperimentazione di questo lavoro di tesi. In particolare, vorrei ringraziare l'Associazione Amici Parkinsoniani Piemonte Onlus per avermi dato l'opportunità di condurre questa ricerca. L'opinione e la collaborazione dei volontari hanno arricchito in modo significativo questo lavoro.

Ringrazio Claudia, Gianluca e Giulia per avermi guidata in questo percorso. La vostra dedizione per la ricerca e la vostra umanità sono state per me un esempio prezioso. Vi ringrazio per avermi mostrato le potenzialità della ricerca, soprattutto rivolta al benessere delle persone.