POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica - Computer Engineering

Tesi di Laurea Magistrale

Soluzioni di gioco robotico per l'allenamento della navigation e la riabilitazione vestibolare

Relatori
prof. Fabrizio Lamberti
dott. Alberto Cannavò

Candidato
Paolo Pirone

Sessione di Luglio 2018

Sommario

Il lavoro di tesi realizzato ha condotto una sperimentazione all'interno del contesto audiologico, più precisamente relativo alla valutazione ed alla riabilitazione delle funzioni audio vestibolari. Nello specifico, l'apparato vestibolare, oltre ad avere la funzione principale di controllare l'equilibrio e la postura, svolge un ruolo importante per quanto riguarda le capacità relative alla *navigation*, ovvero l'orientamento, la rappresentazione spaziale e la memoria topochinetica e topografica. Da recenti studi, infatti, è stato constatato come deficit vestibolari bilaterali cronici possano incidere sulle capacità di memoria spaziale e sull'orientamento. Tuttavia, sebbene in ambito audiologico si parli ampiamente di queste funzionalità, esiste ancora oggi una mancanza di strumenti oggettivi, oggettivabili e misurabili, per valutare, allenare e riabilitare le funzionalità vestibolari e quelle relative alla navigation. Fra i protocolli presenti in ambito clinico, un esempio calzante è il Test di Cesarani, il quale nonostante abbia come obiettivo quello di valutare tali funzionalità, per la sua eccessiva semplicità e rigidità esecutiva, risulta essere decisamente limitato, inficiando la bontà dei risultati laddove si abbia la necessità di più rivalutazioni nel tempo. Questa problematica si rileva anche nel test della marcia su percorsi memorizzati (NAT), in cui il percorso da eseguire si limita alle tre figure geometriche del cerchio, del quadrato e del triangolo, e dunque non prende in considerazione l'abilità di riprodurre, sia a livello motorio che "su carta", mappe "complesse" ovvero composte, come avviene nella realtà, da sequenze di cambi direzionali (vettori) caratterizzate da più elementi. Da queste valutazioni, dunque, è stato definito l'obiettivo della tesi, ovvero di proporre la realizzazione, all'interno della letteratura audiologica, di un sistema, misurabile ed oggettivo, quale nuovo protocollo di analisi ed allenamento di specifiche funzionalità, relative al sistema uditivo (localizzazione sonora), alla navigation e all'apparato vestibolare.

Al fine di realizzare tale sistema sono state prese in considerazione le teorie riguardanti il gioco, nello specifico quelle relative all'ambito dei serious game e dei robotic game. Dai serious game è stato preso quel concetto di gioco, che non ha come unico obiettivo il puro intrattenimento, ma che, attraverso un'esperienza ludica, possa stimolare e motivare un giocatore nel raggiungere dei traguardi più seriosi. Nel dettaglio, è stata posta l'attenzione sugli exergame, ovvero quei giochi che puntano ad apportare un beneficio, un miglioramento alle capacità del giocatore, attraverso un determinato allenamento o training. Con i robotic game, invece, è stato introdotto il concetto di gioco robotico, ovvero la possibilità di immergersi in un'esperienza ludica insieme ad un robot, quale agente razionale con un ruolo ben definito nel contesto di gioco. Dall'applicazione di questi concetti, dunque, è stato definito un protocollo di allenamento, un exergame, attraverso l'uso del robot, il quale ha svolto il ruolo di *trainer* per motivare e stimolare il giocatore nell'immergersi nel programma di allenamento. Per poter progettare tale allenamento è stato utile avvalersi dei principi e delle metodologie dei giochi robotici (PIRG), nello specifico, è stata posta l'attenzione sul principio del riuso e del riciclo. Alla base di tali principi c'è l'idea di riprendere tecnologie commerciali esistenti, a basso costo, riusarle ed integrarle, in modo da

realizzare nuovi strumenti da poter adottare in contesti differenti, rispetto a quelli per cui sono stati progettati. Per tale motivo, sono state selezionate una serie di tecnologie sia hardware che software, al fine di realizzare il sistema proposto. Per quanto riguarda gli aspetti hardware, è stato preso in considerazione l'utilizzo del robot Jumping Sumo della Parrot, al quale è stata integrata una recente tecnologia di tracking, l'HTC Vive Tracker, al fine di poterlo tracciare e definire un controllore di tipo PID, dal momento che tali robot commerciali non sono provvisti di sistemi di localizzazione interni. Il giocatore è stato accessoriato con un controller dell'HTC, sia al fine di tracciarlo, sia per offrigli la possibilità di interagire all'interno dell'applicazione. Sul robot è stata integrata, inoltre, una cassa Bluetooth, con lo scopo di inviare al giocatore segnali audio prestabili per l'allenamento. Dal lato software, è stata realizzata l'unità logica di gioco, avvalendosi del motore grafico Unity3D, dal momento che questo ben si integra a livello software con le tecnologie individuate. Infine, grazie ad una apposita libreria è stato possibile dall'unità logica comunicare e comandare il Jumping Sumo.

Scelte le tecnologie, il passo successivo è stato quello di definire nel dettaglio il protocollo di analisi e d'allenamento. Tuttavia prima di scendere nei particolari, è doveroso fare delle premesse e delle precisazioni per quanto riguarda il lavoro svolto. Infatti, è necessario puntualizzare che il protocollo ideato ha dovuto conformarsi ed adattarsi ad una serie di vincoli e caratteristiche. Innanzitutto, è stata condotta una sperimentazione su una popolazione omogenea per età di individui, non patologici, al fine di effettuare una valutazione preliminare in un contesto di normo-funzionalità. In secondo luogo, essendo questa una metodologia ex-novo in letteratura, non esistono protocolli analoghi con cui fare dei confronti, ed inoltre è stato considerato un piano di ascolto atipico, da terra, differente dal piano a cui il sistema uditivo ha la massima efficienza in termini di localizzazione (piano azimutale, "ad altezza orecchie"). Infine, il tempo avuto a disposizione per utilizzare la strumentazione in ospedale è stato limitato. Dunque, per meglio conformarsi a questa serie di vincoli e considerazioni, è stato proposto un protocollo di training (un exergame), breve ed intenso, quale studio pilota per gettare le basi per lo sviluppo di futuri protocolli di allenamento e riabilitazione, oggettivi, misurabili e adattabili alle specificità dei soggetti, facendo uso del medesimo sistema, robot più tracking. In sintesi, sono stati valutati i pro e i contro della metodologia in oggetto, delegando ad una fase successiva l'eventuale sperimentazione con soggetti patologici. A questo proposito si ricorda che il concetto di exergame, laddove applicato ad una pratica riabilitativa, presume la ripetitività del compito da eseguire durante un lasso temporale prestabilito al fine sia di valutarne gli effetti nel tempo, sia di verificare che i risultati di tale esercizio siano stabili nel tempo. Date queste premesse, sono state poi individuati una serie di indici legati alla navigation, derivandoli da quelli utilizzati nella valutazione clinico-diagnostica routinaria del funzionamento del sistema audio vestibolare. Dunque, sono stati considerati una serie di indici relativi al sistema uditivo (esami audiometrici), all'apparato vestibolare (stabilometria) e alla navigation. Per il sistema uditivo sono stati presi in considerazione, l'indice della pta, che valuta la media della soglia uditiva di un soggetto, adoperata come criterio di inclusione del campione, e lo "speech in noise" con i logotomi, relativo all'intelligibilità dei soggetti, ovvero alla capacità di discriminare una lista di parole prive di significato poste in competizione con rumore. Per quanto riguarda il sistema vestibolare, sono stati rilevati gli indici relativi alla proiezione del centro di gravità sul terreno in condizione statiche ad occhi aperti e chiusi. Nello specifico, sono stati valutati la superficie dell'ellisse "disegnata" e la lunghezza della traccia, per valutare la precisione e l'energia spesa da un soggetto nel restare in una postura di equilibrio. Infine, in ambito navigation, è stato considerato l'unico test che prevedeva un punteggio di valutazione, ovvero il Test di Cesarani, al quale è stato affiancato un test realizzato con l'uso del robot, come evoluzione del Test di Cesarani stesso, denominato Test di Riproduzione speculare. Date queste premesse e questi indici, sono stati dunque definiti due sotto-obiettivi principali. In primo luogo, verificare se un training, breve ed intenso, somministrato su una popolazione sana, comportasse una variazione di almeno uno degli indici scelti e in caso positivo osservare che tipo di variazione intervenuta. Dall'altro lato, invece, verificare l'applicabilità del Test di Riproduzione speculare, ponendolo a confronto con il Test di Cesarani. Il training è stato suddiviso in tre fasi: Test, Allenamento e Retest. Nelle fasi di Test e Retest sono stati valutati gli indici scelti, per constatare eventuali variazioni significative, mentre la fase di allenamento prevedeva una serie di esercizi attraverso l'uso del sistema proposto, eseguiti in condizioni di deprivazione visiva, in modo che i soggetti facessero uso solo del sistema uditivo e della memoria spaziale per orientarsi nell'ambiente. Per valutare

l'allenamento con il robot, è stata selezionata una popolazione di soggetti di età compresa tra i 20 e 30 anni, normoacustici, suddivisa in due sottogruppi, il campione di studio e il campione di controllo. Il campione di studio ha eseguito l'allenamento con il robot, mentre il campione di controllo solo le fasi di valutazione degli indici, in modo da poter disambiguare l'eventuale effetto di miglioramento, dovuto all'allenamento intrinseco dell'esecuzione delle fasi di Test e Retest. Per quanto riguarda gli esercizi dell'allenamento, sono stati realizzate due differenti tipologie: l'esercizio di localizzazione sonora, nel quale è stata stimolata la polarità di risposta direzionale del campione, analogamente a come avviene negli esami per la valutazione della capacità di discriminazione percettiva; l'esercizio di inseguimento, dove sono state allenate le capacità del soggetto di equilibrio dinamico e rappresentazione spaziale, nell'inseguire il robot, cercando di mantenere una distanza minima. In ciascun esercizio sono state stimolate entrambe le polarità dell'udito e i segnali audio sono stati scelti, in base alla risposta percettiva delle orecchie, variando la posizione (attraverso i movimenti del robot) e la frequenza della sorgente sonora. Per quanto riguarda il test di valutazione sulla navigation, è stata realizzata un'evoluzione del Test di Cesarani, mantenendo lo stesso span di memoria. A differenza del Test di Cesarani, in cui il soggetto riceve comandi vocali per disegnare a terra una figura chiusa, semplice (un quadrato), nel Test di Riproduzione speculare il soggetto riceve una serie di comandi visivi dal robot, dati dagli spostamenti vettoriali che quest'ultimo esegue. Il test è suddiviso in due fasi, una motoria in cui il soggetto deve eseguire lo stesso percorso fatto dal robot in maniera speculare, invertendo le direzioni lungo l'asse centrale (virtuale) che divide a metà l'area di gioco, ed una di riproduzione su carta, dove il soggetto deve disegnare su un foglio il tragitto, non percorso da lui, ma dal robot, in modo da poter fare una valutazione relativa alla capacità di rappresentazione spaziale e di memoria a breve termine.

I risultati della sperimentazione hanno mostrato valori interessanti relativi all'apparato vestibolare e all'intelligibilità del campione di studio. Nello specifico, è stato osservato come l'allenamento con il robot abbia inciso in modo completamente differente sul campione di studio, rispetto al campione di controllo, andando ad incidere su specifiche funzionalità, attraverso una ridistribuzione delle energie cognitive, dovuto ad uno spostamento del focus dell'attenzione. In conclusione, il lavoro di tesi ha raggiunto gli obiettivi prefissati, poiché l'allenamento ha portato al miglioramento di più di un indice, evidenziando l'importanza del ruolo svolto dall'attenzione, mentre il Test di Riproduzione speculare ha dimostrato di essere una valutazione, oltre che oggettiva e misurabile, meno semplice da apprendere del Test di Cesarani e, soprattutto, personalizzabile. Il sistema, robot più tracker, oltre ad essere una metodologia misurabile, è risultata essere accessibile, dal momento che sono stati presi ed integrati dispositivi commerciali, a basso costo, creando un nuovo strumento, da inserire in un contesto non ludico ma serioso, quale l'ambito medico ed ospedaliero. In aggiunta, il sistema è stato valutato dai soggetti in modo positivo, facile da usare, da apprendere, interessante, dal momento che la presenza del robot ha motivato e stimolato quest'ultimi ad immergersi all'interno di un programma di training.

Indice

1 Introduzione 9

2 Stato dell'arte 12

2.1 Serious game . . . 12

2.1.1 Definizione . . . 12

2.1.2 Cenni storici . . . 13

2.1.3 Motivazioni . . . 14

2.1.4 Tassonomia . . . 15

2.1.5 Esempi . . . 16

2.2 Health game . . . 20

2.2.1 Introduzione . . . 20

2.2.2 L'importanza della motivazione . . . 20

2.2.3 Classificazione . . . 22

2.2.4 Exercise game . . . 23

2.2.5 Esempi . . . 26

2.3 Robotic game . . . 28

2.3.1 Introduzione . . . 28

2.3.2 Linee Guida nei PIRG . . . 29

2.3.3 Lavori correlati . . . 30

3 Tecnologie 34

3.1 Hardware . . . 34

3.1.1 Jumping Sumo . . . 34

3.1.2 HTC Vive . . . 35

3.1.3 Cassa Bluetooth . . . 37

3.2 Software . . . 37

3.2.1 Libreria Jumping Sumo . . . 37

3.2.2 Unity3D Game Engine . . . 38

3.2.3 Controllore PID . . . 39

4 Progettazione 41
4.1 Specifica dei requisiti . . . 41
4.1.1 Introduzione . . . 41
4.1.2 Considerazioni empiriche sul robot . . . 41
4.1.3 Controllo del robot . . . 44
4.1.4 Idee di gioco . . . 46
4.1.5 Valutazione delle idee di gioco . . . 50
4.1.6 Sistema uditivo, apparato vestibolare e navigation. . . . 51
4.1.7 Obiettivo del lavoro di tesi . . . 63
4.2 Architettura del sistema . . . 64
4.3 Realizzazione . . . 65
4.3.1 Premesse . . . 65
4.3.2 Sviluppo del protocollo . . . 65
4.3.3 Test di Riproduzione speculare . . . 67
4.3.4 Esercizio di Inseguimento . . . 69
4.3.5 Esercizio di Localizzazione . . . 71

5 Sperimentazione 75
5.1 Introduzione . . . 75
5.1.1 Protocollo definitivo . . . 75
5.1.2 Indici . . . 77
5.1.3 Campione di soggetti . . . 82
5.2 Risultati sperimentazione . . . 82
5.2.1 Risultati allenamento . . . 82
5.2.2 Risultati test navigation . . . 86
5.2.3 Conclusioni . . . 87
5.3 Questionari . . . 88

6 Conclusioni 91

Elenco delle figure 93

Elenco delle tabelle 96

Bibliografia 97

Capitolo 1

Introduzione

La vita dell'uomo è stata caratterizzata, fin dall'antichità, dalla presenza costante di un'attività, che ha svolto un ruolo importante nella propria quotidianità: il gioco. Il gioco è un qualsiasi tipo di attività, a cui bambini o adulti si dedicano, singolarmente o in gruppo, senza nessuno scopo particolare o fine immediato, ma, essenzialmente, ha come unico obiettivo la ricreazione, lo svago e l'intrattenimento [1] [2]. Dunque, il gioco è un attività piacevole, divertente, che coinvolge le persone in modo libero, spontaneo e volontario, che non nasce dalla ricerca di obiettivi estrinseci, ma trova le proprie motivazioni dentro la persona stessa.

L'attività ludica ha avuto un ruolo importante, non solo per l'intrattenimento dell'uomo, ma anche negli aspetti sociali, antropologici, filosofici. Il gioco consentiva alle persone di sviluppare le capacità fisiche, mentali, intellettive, di immaginazione, di esorcizzare le paure, di rapportarsi con gli altri, creando relazioni sociali. Tramite quest'attività era possibile, anche, educare le generazioni future, trasmettere le conoscenze, facilitare il ragionamento nella risoluzione di problemi complessi. In "Homo ludens", Huizinga, considerato uno dei maggiori teorici del gioco, considera l'attività ludica, qualcosa di più antico della cultura, che ha spinto alla nascita delle varie arti umanistiche e scientifiche dell'uomo [3]. Il gioco è considerato un'attività che va oltre l'aspetto fisiologico, corporale, legato a scopi di sopravvivenza o di sussistenza, ma, dà l'opportunità all'uomo di sentirsi libero, di crearsi una realtà fittizia, diversa da quella reale, senza dover seguire regole razionali o ricercare obiettivi materiali. Roger Caillois, nel libro "I Giochi e gli Uomini", descrive il gioco come "uno spazio separato dalla realtà comune", dove non valgono le regole e i modi della vita quotidiana [4]. L'autore propone, a sua volta, una classificazione dei giochi, in base al tipo di attività e all'atteggiamento dei giocatori:

- l'Agon, gioco di competizione, che esprime l'ambizione di trionfare grazie alle proprie capacità personali;
- l'Alea, gioco regolato dal caso, dove un giocatore mette da parte le proprie capacità, aspettando in modo passivo e ansioso le decisioni della sorte;
- il Mimicry, gioco che favorisce l'assunzione di una personalità diversa dalla propria;
- l'Ilinx, gioco in ci si va alla ricerca della vertigine, della consapevolezza di sè, seguita dalla perdita della stabilità e della percezione.

Queste categorie di giochi, a loro volta, possono essere svolte o in maniera libera, sfrenata, con la fantasia e l'immaginazione, senza una rigida organizzazione di regole, o d'altra parte, si cerca di trovare nel gioco delle regole, degli obiettivi, una organizzazione e un maggiore controllo. Nel primo caso si parla di *paidia*, ossia il gioco è visto nella sua intimità, nella sua purezza e ingenuità, mentre, nell'altro caso, l'autore descrive il gioco come *ludus*, che rappresenta lo stato di completamento ed educazione della paidia, ovvero come il passaggio dall'infanzia alla vita adulta. Ogni gioco, dunque, può degenerare dalla paidia al ludus in diverse forme, quali gioco d'azzardo, di guerra, di competizione, di superstizione, conducendo alla follia, alle droghe, allo sdoppiamento della personalità.

I giochi, con il tempo, si sono sempre più evoluti, partendo da attività semplici, che includevano tavolozze, dadi, oggetti quotidiani, passando, poi, per attività più complesse, come lo sport, fino ad arrivare ai giorni nostri, dove la tecnologia ha portato il gioco ad un nuovo livello: i videogiochi. Dall'enciclopedia Treccani, un videogioco è descritto come "un dispositivo elettronico che consente di giocare interagendo con le immagini di uno schermo" [5]. Dunque, il videogioco consente all'uomo di distaccarsi, effettivamente, dalla realtà che lo circonda, e di immergersi in una dimensione virtuale, sebbene sia bidimensionale (schermo). I videogiochi, sin dalla loro nascita , hanno avuto un enorme successo, che ha influenzato sempre di più la vita delle persone: tant'è vero che il settore dei videogiochi è divenuto oggigiorno uno dei più redditizi e innovativi. In Italia, nel 2017, il mercato dei videogiochi ha registrato un giro d'affari quasi di 1.5 miliardi di euro [6]. E' stato riscontrato che 17 milioni di persone hanno avuto un'esperienza di gioco negli ultimi 12 mesi, di cui il 59% uomini e il 41% donne, in una fascia di età che va dai 25 ai 34 anni. D'altra parte, il mondo videoludico, oltre ad apportare degli enormi cambiamenti nell'intrattenimento, ha introdotto anche delle problematiche, riguardanti la vita delle persone. Essendo il videogioco, generalmente, un'attività svolta, seduti, davanti ad uno schermo, in uno spazio circoscritto e limitato, è stato riscontrato un cambiamento nello stile di vita delle persone. Infatti, diversi studi hanno evidenziato come, i giocatori più assidui, abbiano uno stile di vita sedentario, non praticando nessun tipo di attività fisica [7]. A questo si aggiunge, anche, una minima percentuale di giocatori, che tendono ad isolarsi dalla realtà, passando buona parte del tempo nel mondo virtuale. Tutto ciò ha evidenziato, quindi, l'insorgere di diverse patologie, quali l'obesità giovanile, lo stress, problemi di metabolismo, malattie cardiovascolari, disturbi mentali [8]. Questi fenomeni si riscontrano sopratutto nelle società avanzate tecnologicamente, dove, le nuove generazioni, sin da piccole, vengono a contato con dispositivi e strumenti (esempio, smartphone, internet, televisioni), che hanno distorto il loro modo di concepire il gioco e le interazioni sociali. Queste problematiche hanno condotto la società alla ricerca di soluzioni, quali, il ritorno ad una attività ludica più fisica, che includesse, però, i vantaggi delle tecnologie, e la riformulazione del concetto di gioco, come attività puramente di intrattenimento. Pertanto, da un lato, è stato osservato lo sviluppo di nuovi strumenti di gioco, quali la Nintendo Wii, il Kinect di Microsoft, i visori di realtà virtuale, dall'altro lato, è stato ripreso il concetto di serious game.

In sintesi, il serious game è una tipologia di gioco, che punta ad avere uno scopo più rilevante, rispetto a quello puramente ludico. Con i serious game si vuole ritornare a quell'idea di gioco, che oltre a divertire, potesse insegnare, trasmettere valori, educare. Il serious game ha ripreso gli aspetti positivi dei giochi, quali l'intrattenimento, il coinvolgimento, la motivazione, e li ha trasposti in un altro contesto. Con il tempo si sono sviluppati tantissime tipologie di serious game, in ambito educativo, militare, medico, sportivo. Lo scopo è quello di allenare militari, sportivi, insegnare concetti nelle scuole, riabilitare persone con patologie, ecc. Ai serious game si sono affiancate, poi, le nuove tecnologie, quali visori, controller, dispositivi di tracciamento, che hanno migliorato l'esperienza, sia ludica che "seriosa", dei giocatori, lasciando una forte impronta nella società. Infatti, dal rapporto di ricerca "Augmented Reality and Virtual Reality Market" [9], è previsto un incremento del mercato della realtà aumentata (AR), dagli 11.4 miliardi di dollari attuali fino ai 60.5 miliardi, entro il 2023, con un tasso di crescita annuale del 40.23%. Per la realtà virtuale (VR) si prevede una crescita dai 7.90 miliardi fino a 34.08 nel 2023, con una tasso di crescita del 33.95% circa. Le motivazioni di tale andamento sono varie, quali la maggiore richiesta di nuove strumentazioni, in ambito medico, retail, e-commerce, e i continui investimenti per rendere la tecnologia sempre più avanzata e sostenibile, in modo che possa divenire più accessibile e diffusa tra le persone comuni.

Lo sviluppo tecnologico ha portato cambiamenti e innovazioni anche in ambito robotico, consentendo di avere robot sempre più accessibili e alla portata del pubblico. Infatti, dal report di Tractica risulta che i robot non industriali rappresentano il 70% dei 39.3 miliardi di dollari del mercato globale, nel 2017, con una crescita del 64% dal 2016 [10]. Alla fine del 2018, i robot non industriali saranno il 76% del mercato totale, con un crescita pari a 52.7 miliardi di dollari [11]. Inoltre, si prevede che il mercato dei robot crescerà rapidamente tra il 2016 e il 2022, ottenendo ricavi, derivanti dalla vendita unitaria di robot industriali e non industriali, che passeranno dai 31 miliardi di dollari, nel 2016, ai 237 miliardi entro il 2022 [12]. Lo sviluppo dei robot commerciali dal basso costo, ha consentito, in seguito, il nascere di una nuova tipologia di giochi: i robotic games. I robotic games prevedono all'interno di un contesto di gioco, ludico

o serioso, la presenza di robot. Lo scopo di questi giochi è di dare ai robot commerciali un uso diverso da quello per cui sono stati creati. Con i robotic games, dunque, i robot assumono un ruolo diverso, dal momento che non sono più considerati semplici strumenti o oggetti passivi del gioco, ma diventano attori razionali, con uno scopo ed un obiettivo, confrontandosi direttamente con i giocatori. Questo, unito alle nuove tecnologie in ambito VR e AR, ha spinto i giocatori a spostare il proprio interesse, da un ambiente di gioco bidimensionale e sedentario, ad uno fisico e tridimensionale. Questa soluzione, a sua volta, ha avuto svariate applicazioni, in ambito medico, educativo, riabilitativo, militare, terapeutico.

E' proprio in questo contesto che si inserisce, dunque, il lavoro di tesi, il cui obiettivo è stato quello di realizzare un serious game, nel particolare un exergame, come applicazione per l'allenamento della navigation e per la riabilitazione vestibolare, dal momento che, sebbene in letteratura audiologica si parli ampiamente dell'importanza di queste funzionalità, esiste ancora oggi una lacuna di strumenti oggettivi e misurabili per fare valutare, allenare e riabilitare le funzioni vestibolari e relative alla navigation. Nello specifico, lo scopo della tesi è stato quello di proporre la realizzazione di un sistema, oggettivo e misurabile, da introdurre in letteratura, quale nuovo protocollo di analisi e allenamento di specifiche funzionalità, relative al sistema uditivo, all'apparato vestibolare e alla navigation. Il sistema realizzato ha previsto l'integrazione di un robot commerciale (Jumping Sumo) con un dispositivo di tracciamento (HTC Vive Tracker).

Nei capitoli successivi si affronteranno, nel dettaglio, le tematiche qui presentate, in base alla seguente suddivisione:

- Capitolo 2: Stato dell'arte
  In questo capitolo verrà fornita una panoramica sui serious game, in particolare sui *health game* e gli exergame, concludendo con i robotic game.
- Capitolo 3: Tecnologie
  In questo capitolo verranno descritte le tecnologie hardware e software, utilizzate nel lavoro di tesi.
- Capitolo 4: Progettazione
  In questo capitolo si approfondiranno le fasi di sviluppo del progetto, dalla specifica dei requisiti, fino alla soluzione finale.
- Capitolo 5: Sperimentazione
  In questo capitolo verrà introdotta la fase di sperimentazione del sistema, con le relative analisi e considerazioni.
- Capitolo 6: Conclusioni
  In questo capitolo verranno riportate considerazioni sui punti di forza e sulle problematiche della soluzione, indicando possibili sviluppi futuri.

Capitolo 2

Stato dell'arte

In questo capitolo verrà riportata una panoramica sui serious game, dalla loro definizione fino a degli esempi pratici sviluppati negli anni. Inoltre verrà posta l'attenzione ad una particolare categoria di serious game, gli exergame, passando infine per i robotic game.

2.1 Serious game

2.1.1 Definizione

Esistono svariate definizioni di serious game in letteratura. E' opportuno citare quella presente in "Serious Games"[13]:

> *"A serious game is a digital game created with the intention to entertain and to achieve at least one additional goal (e.g., learning or health). These additional goals are named characterizing goals."*

Quindi un serious game è un *digital game*, ossia un gioco che fa un uso di un qualsiasi sistema, macchina di computazione, sviluppato per intrattenere il giocatore ed in più avere uno o più scopi aggiuntivi. Quest'ultimi possono spaziare in diversi campi, dal training all'educazione, dalla scienza alla salute.

Altri testi definiscono il serious game come un gioco progettato per avere un obiettivo primario, non essenzialmente ludico [14]; altri rimandano la coniazione del termine a Clarck C. Abt, il quale descrisse il serious game con le seguenti parole [15]:

> *"We are concerned with serious games in the sense that these games have an explicit and carefully thought-out educational purpose and are not intended to be played primarily for amusement".*

L'autore, in sintesi, afferma che i serious game hanno uno scopo educativo esplicito e attentamente ponderato, non ideati per avere una finalità principalmente di intrattenimento. Alcuni ricercatori reputano il serious game come una tecnica di marketing, dal momento che in ogni videogioco sono presenti tematiche serious, mentre, per altri, solo nella testa dello sviluppatore è possibile comprendere se un gioco è più o meno serioso.

Gli autori di "An Overview of Serious Games" [15], descrivono il serious game come un'applicazione basata su tre fattori: esperienza, intrattenimento e multimedia (Figura 2.1).

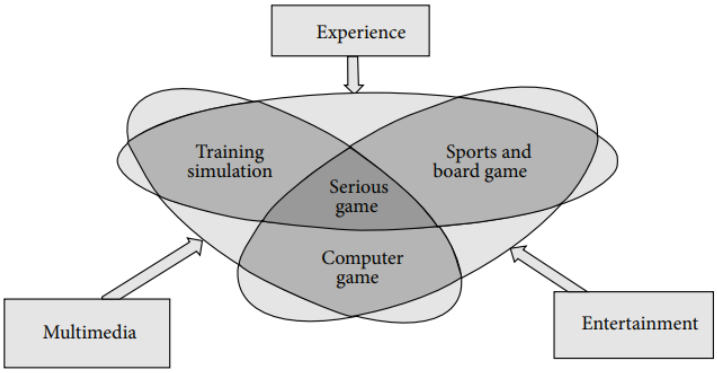

Figura 2.1: Definizione di serious game in [15].

2.1.2 Cenni storici

Nella storia dei serious game ci sono stati dei momenti fondamentali, che ne hanno segnato la crescita e l'evoluzione, mostrati in Figura 2.2 [15].

Year	Serious game	Application
1970	Serious Games book by C. Abt	Academic book
1972	Magnavox Odyssey	Education
1973	The Oregon Trail	Education
1980	BattleZone	Training
1981	The Bradley Trainer	Training
1982/1983	Pole Position/Atari VCS 2600 console	Training
1996	Marine Doom	Military
2002	America's Army	Military
2003	DARWARS	Military
2005	VBS1	Military
2006	BiLAT	Interpersonal communication
2009	VBS2/Game After Ambush	Military
2012	X-Plane 10	Training

Figura 2.2: Pietre miliari della storia dei serious game.

Come già accennato nel paragrafo 2.1.1, Abt usò un innovativo metodo di approccio ai giochi, da applicare nei campi dell'educazione, della scienza, del training, definendo nel 1961 un gioco per l'allenamento degli ufficiali militari statunitensi. Questo di certo non fu il primo esempio di gioco usato in ambito militare, infatti durante la Seconda Guerra Mondiale, l'esercito degli Stati Uniti fu il primo a fare l'uso dei *wargames* per migliorare l'immagine di sè agli occhi dell'opinione pubblica.

Il primo vero serious game lo si può ricondurre al 1972, quando nel mercato americano venne presentata la prima console commerciale, la Magnavox Odyssey, ideata nel 1966 da Ralph Baer. Questa era stata realizzata per avere un scopo essenzialmente educativo.

Pochi anni dopo, nel 1973, la Minnesota Educational Computing Consortium (MECC) sviluppò due serious game, "The Oregon Trail" e "Lemonade Stand". Il primo aveva lo scopo di insegnare la storia del colonialismo americano, mentre, il secondo si focalizzava sul *business management*.

Negli anni '80 erano già disponibili exercise game per l'Atari VCS 2600 e il Nintendo NES. Nel 1981, venne sviluppato, di nuovo, per l'esercito degli Stati Uniti un simulatore, noto come "The Bradley Trainer", per allenare le nuove reclute sull'uso del omonimo carrarmato. Questi fu realizzato dall'Atari, perché ne prese spunto dall'arcade game "Battlezone".

Nel 1996 il gioco "Marine Doom" fu usato per allenare i membri della marina statunitense. Tuttavia Il termine serious game diventa popolare solo nel 2002 grazie a due avvenimenti: la pubblicazione del paper "Serious Games: Improving Public Policy through Game based Learning and Simulation" di Sawyer e Rejetski e l'uscita del videogioco "America's Army" (Figura

2.3). Quest'ultimo, sviluppato dall'agenzia "Joint War Games" dell'esercito americano, è un gioco che immerge l'utente in realistiche situazioni di combattimento militare, con armi e uniformi della fanteria. Lo scopo era quella di supportare il reclutamento di giovani leve, tant'è vero che il miglior giocatore avrebbe ricevuto una lettera per unirsi all'esercito degli Stati Uniti.

Figura 2.3: Immagini del serious game America's Army, utilizzato tutt'oggi per il reclutamento di giovani leve [14].

Negli anni a venire i serious game divennero di dominio pubblico anche grazie allo sviluppo tecnologico: infatti, nel 2006, gli exercise game ottennero un grande successo grazie all'uscita della Nintendo Wii, la quale dava all'utente una nuova modalità di interazione, il Wii Remote Controller insieme ad una balance board.

Successivamente, fu la Microsoft a fare un nuovo passo nel campo delle tecnologie innovative con il Kinect, un dispositivo che, tramite ad una camera e dei sensori, riusciva a tracciare i movimenti del corpo umano, dando maggiore libertà di gioco all'utente e un nuovo tipo di interazione, adatta a tutti quei giochi serious ideati per il training.

In conclusione, è possibile constatare che il continuo sviluppo di nuove tecnologie ha comportato un sempre più crescente aumento nella disponibilità e nell'utilizzo dei serious game: basti pensare che tra gli anni '80 e '90 se ne contavano massimo 40 giochi, mentre dagli anni '90 ai primi anni 2000 si è arrivati sugli 80 giochi, fino a raggiungerne i 240 negli ultimi periodi. Nel 2010 il mercato dei serious game valeva 1.5 miliardi di dollari, con un tasso di crescita stimato quasi del 100% [13] [15].

2.1.3 Motivazioni

Ci si potrebbe chiedere a questo punto perché vengano realizzati i serious game. Innanzitutto per il semplice motivo che un buon gioco riesce a coinvolgere su più livelli un utente. Una bella storia, delle buone meccaniche di interazione catturano non solo l'interesse del giocatore ma anche la sua sensibilità, la sua emotività, spingendolo ad applicarsi totalmente nell'adempiere lo scopo, l'obiettivo richiesto. E se quest'ultimo nasconde in sè un fine al di là di quello puramente ludico, si possono ottenere dei buoni risultati, come per esempio nel campo dell'istruzione e dell'educazione. In effetti, i serious game non sono nati solo ed esclusivamente per insegnare o educare, ma anche per fare pratica in vari ambiti, come quello medico, sportivo, o comunque dare la possibilità di immergersi in contesti reali. Con le attuali tecnologie, infatti, i giochi permettono ad un utente di vivere situazioni sempre più realistiche, standosene seduti sulla propria sedia o nel proprio salotto di casa.

Dunque, la capacità dei giochi di adattarsi a diversi contesti e di fornire svariati feedback in tempo reale, inducono l'utente ad applicare il massimo sforzo, poiché si sentono parte dell'ambiente in cui sono chiamati ad agire. Inoltre, l'elasticità dei giochi dà la possibilità di regolare il target del serious game alle abilità e l'umore del giocatore, cosa che non sarebbe possibile in situazioni di gioco reale. In estrema sintesi, la tematica serious si associa bene al contesto del *gaming*, poiché questo fornisce una miriade di possibilità di personalizzare l'esperienza, sia ludica che non, del giocatore.

D'altra parte il termine serious potrebbe far storcere il naso a coloro che vedono contrapporsi due termini, ossimori tra loro, "serious" e "game", o, d'altra parte, non tutti sarebbero motivati, coinvolti, nell'applicarsi in un gioco che deve essere serioso. I giocatori, quindi, potrebbero considerare il serious game come un tentativo flebile di nascondere qualcosa, di non piacevole, ludico e divertente, all'interno una scatola ben confezionata, come nella metafora del "chocolate-covered broccoli", mostrata in Figura 2.4.

Figura 2.4: Metafora del "Chocolate covered broccoli".

In sintesi, bisogna trovare un buon compromesso tra le due tematiche che si vogliono coinvolgere, per realizzare un prodotto che dia qualcosa in più all'utente, oltre l'esperienza ludica, ricordandosi che un giocatore è sempre al centro nella realizzazione di un gioco e non gli piace essere manipolato o raggirato con "finti giochi di intrattenimento" [13].

2.1.4 Tassonomia

In letteratura esistono varie classificazioni dei serious game. In "Serious Game Taxonomy", Sawyer definisce due principali criteri di valutazione: il target di mercato o dominio applicativo e lo scopo (del game designer) [14]. In [15] sono citati una serie di criteri fondamentali per il successo di un serious game. Questi, sintetizzati in Figura 2.5, sono i seguenti:

- Activity;
- Modality;
- Interation Style;
- Environment;
- Application Area.

Per Activity si intende il tipo di azione che l'utente deve compiere, ad esempio uno sforzo fisico o mentale. La Modality definisce come avviene la trasmissione dell'informazione dal gioco all'utente. Il modo con cui un giocatore riceve feedback dall'applicazione è di vitale importanza per avere un'esperienza di gioco di successo. Tra le modalità più comuni vi sono quella visuale, uditiva e tattile. L'Interaction Style descrive, invece, il tipo di input del giocatore. Si parte dai device più tradizionali, come mouse, tastiera e joystick, a quelli più complessi, quali body

tracking (Microsoft Kinect) e remote controller (Nintendo Wii). L'Environment definisce le caratteristiche dell'ambiente di gioco: 2D/3D, realtà mista, virtuale o aumentata, online, il tipo di mobilità, single o multiplayer. Infine l'Application Area definisce il dominio applicativo del gioco, ossia il target di utenti al quale si vuole rivolgere: studenti (*education*, *cultural heritage game*), militari (*training game)*, persone con problemi fisici (*health care game*), ecc.

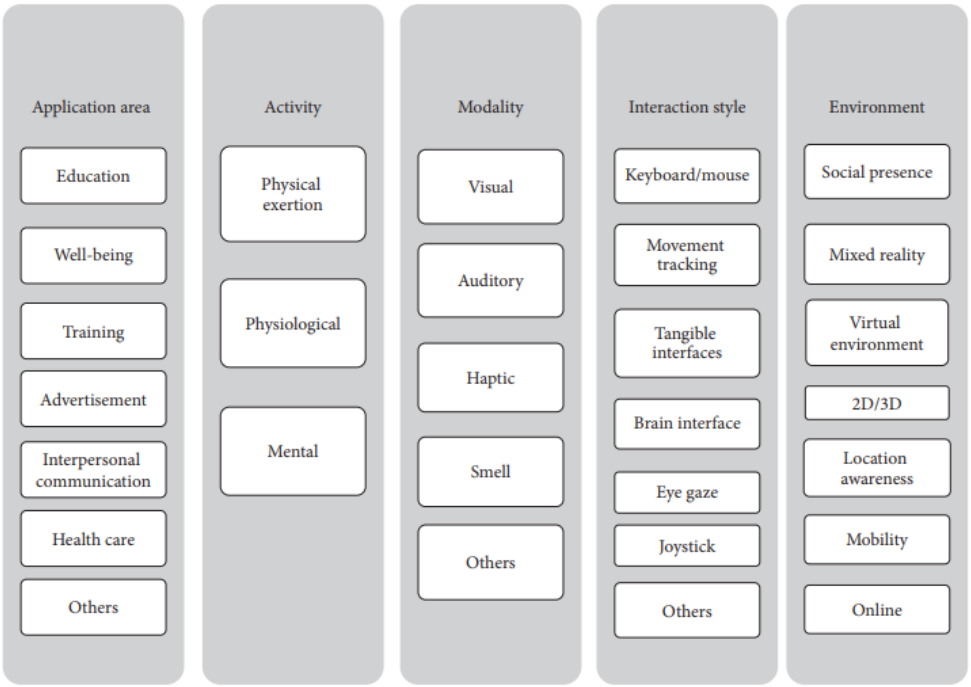

Figura 2.5: Tassonomia dei serious game descritta in [15].

2.1.5 Esempi

In questo paragrafo verranno descritti una serie di esempi pratici di serious game, tratti dal libro "Serious Games" [13], per avere una visione più chiara dei vari concetti trattati in precedenza.

VIPOL - Virtual Training for Police Forces
Realizzato da Markus Herkersorf, ViPOL rientra nella categoria del training game. Il suo scopo è quello allenare le forze di polizia in scenari che sono troppi complessi e difficili per delle esercitazioni dal vivo. Le varie missioni sono ambientate in uno mondo virtuale composto da contesti sia urbani che rurali. Il tutto è progettato come un gioco multiplayer all'interno di una intranet sicura, provvisto di un editor di scenario, che consente di stabilire vari fattori per ciascuna missione, quali condizioni climatiche, posizioni di oggetti e avatar, e la possibilità di inserirvi all'interno agenti autonomi, guidati da un'intelligenza artificiale. Un allenatore stabilisce le regole ed i ruoli ad inizio scenario per ciascun partecipante, che può unirsi alla partita tramite la propria postazione. Quest'ultimi possono comunicare grazie a un servizio VoIP integrato e hanno a disposizione un avatar, che può camminare, correre, saltare, accovacciarsi, usare un equipaggiamento e molto di più.

Ulteriori informazioni del progetto sono disponibili sul sito KMRC `http://www.iwm-kmrc.de` e su TriCAT `http://www.tricat.net`

Figura 2.6: ViPOL, gioco virtuale per le forze di polizia.

Lost in Earth 2307
Si tratta di un gioco di strategia 4X, nato per l'allenamento nel campo del telerilevamento (*remote sensing*). Il tutto è ambientato in un futuro sci-fi, dove il giocatore fa parte di un gruppo di ribelli, il cui scopo è quello di liberare le colonie umane dalle grinfie del culto "tecnofobico" (Figura 2.7). Per adempiere alla propria missione il giocatore deve, in varie fasi del gioco, interpretare delle immagini e produrne un valido report. La qualità del report determina il successo o meno della missione e influenza vari fattori, come ad esempio il morale della colonia. Nell'ottica del gioco di strategia, il giocatore deve costruire sensori, tool e strutture per difendere o attaccare il culto ostile. Per quanto riguarda ulteriori informazioni oltre a contattare gli autori, Daniel Szentes e Alexander Streicher, è possibile visitare il sito http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/11/

Ludwig - Digital Educational Game for Physics
Il gioco (http://www.playludwig.com/), di Michael Kickmeier-Rust, è stato sviluppato per l'ambito dell'educazione dei bambini dagli 11 anni. I giocatori si ritrovano a vivere un'avventura 3D interattiva, dove possono esplorare liberamente il mondo creato. Lo scopo è quello di risolvere piccoli esperimenti, che consentono di accedere man mano a conoscenze di base, per quanto riguarda gli argomenti dei fossili e delle energie rinnovabili.

Yes or Know - Combining Board Games and Smart Play
La novità di questo gioco è quella di unire le caratteristiche dei vecchi gioca da tavolo trivia e la tecnologia dello smartphone. Nato per essere un gioco di società, Yes or Know, propone una serie di quiz, domande in diverse categorie tramite un app scaricabile sul cellulare.

Oltre a questi semplici esempi, ci sarebbero tanti serious game da citare (Figura 2.10): giochi di simulazione (3DSim@GBT, SchaVIS, Ship Simulator, Learn2work, Uni Game), educativi (Physikus HD, Internet Hero), giochi sul patrimonio culturale (Roma Nova), ecc.

Figura 2.7: Lost Earth 2307 - ponte principale (a), istantanee della mappa della galassia e dei report per l'interpretazione delle immagini (b), componenti dell'aspetto strategico del gioco (esempio vista infrarossi) (c).

Figura 2.8: Istantanea di Ludwig.

Figura 2.9: Yes or know, gioco da tavolo che unisce le caratteristiche dei classici giochi trivia con la tecnologia dello smartphone.

Figura 2.10: Altri esempi di serious game: Uni Game - Vita da campus e università (a), Internet Hero - Imparare i pro e i contro di internet (b), Ship Simulator (c), SchaVIS - prevenzione e simulazione di alluvioni (d), Physikus HD - avventura per imparare la fisica (e), Roma Nova - utenti interagiscono usando il NeuroSky MindSete e il dispositivo Emotive (f), 3DSim@GBT - simulazione e training nel tunnel del Gotthard in Svizzera (g), Learn2work - simulazione gestione di un azienda (h) [13].

2.2 Health game

Prima di trattare degli exergame è bene andare a descrivere ed approfondire il campo a cui essi fanno parte, gli health game.

2.2.1 Introduzione

Il "Games for Health Project" definisce gli health game come

> *"game technologies that improve health and the delivery of health care"* [16].

Dunque, gli health game sono tecnologie di gioco che puntano al miglioramento della salute, del benessere e all'assistenza sanitaria. Altri termini sono inoltre accettati in letteratura per definire gli health games, quali *serious games for health*, *eHealth games*, *digital health games* e *games for health*. Per non creare confusione ci rifaremo solamente ai termini health game e games for health. Esistono anche altre definizioni come *rehabilitation game*, *fitness game* e i già citati exergame, i quali però non vanno confusi con gli health game, poiché rappresentano una loro specifica sottoclasse.

Indipendentemente dallo specifico settore di applicazione (educazione, training, riabilitazione, prevenzione, medicina, ecc.), i games for health possiedono tre principali caratteristiche: Motivation, Guidance e Analysis.

La prima è la motivazione, ossia la capacità di indurre il giocatore a compiere un certo numero di task, che possono essere stancanti e ripetitivi. E' proprio infatti in questi tipi di situazioni, che le abilità di intrattenimento e divertimento dei giochi sono essenziali. Esempi di applicazioni degli health game sono nell'ambito della fisioterapia o della riabilitazione, dove i pazienti eseguono in successione esercizi che possono essere estenuanti.

La seconda caratteristica la si può definire l'assistenza, che consiste nel ricevere una guida e una continua ricezione di feedback all'interno del gioco. Tutto ciò consente al giocatore di riuscire a completare il suo task, minimizzando le possibilità che tutto vada male. Un esempio può essere la correzione della postura fatta negli esercizi di fisioterapia, dove l'utente viene guidato nei movimenti da eseguire.

Infine, l'ultimo termine si traduce come il supporto all'analisi e al processo delle informazioni, per quanto riguarda le prestazioni dell'utente lungo tutto il periodo di gioco. Queste offrono, dunque, la possibilità di fornire dati statistici, informazioni prestazionali, diagnosi e quant'altro, che possono essere di aiuto per la salute e il benessere del giocatore [16].

2.2.2 L'importanza della motivazione

Come già detto nel paragrafo 2.2.1, la motivazione è uno dei fattori essenziali per una buona riuscita di un games for health, poiché questa spinge l'utente a sentirsi coinvolto da un gioco, senza pensare allo sforzo da compiere, nell'eseguire una serie di attività potenzialmente boriose.

Purtroppo realizzare un gioco di questo genere non è così semplice di come possa sembrare: infatti, bisogna spesso trovare un buon compromesso, un bilanciamento tra le sfide presentate nel gioco e le abilità del giocatore. Un'attività di una certa difficoltà imposta ad un utente con scarse qualità comporta un sicuro abbandono del gioco o comunque sentimenti di frustrazione e risentimento. Dunque, nella progettazione di un health game bisogna realizzare compiti, attività adeguate che riescano ad adattarsi nel tempo al tipo di giocatore.

A tal proposito esistono varie teorie, modelli in letteratura, che descrivono buone metodologie per la realizzazione di un health game. Per quanto riguarda l'esperienza personale di gioco dell'utente e i fattori che la determinano, sono citati i *psychological model*. Questi si suddividono in due classi (Figura 2.11): i modelli generici (generic), che abbracciano un'ampia gamma di applicazioni, tra i cui i giochi, e i modelli specifici di dominio (domain-specific), sviluppati essenzialmente per il gaming.

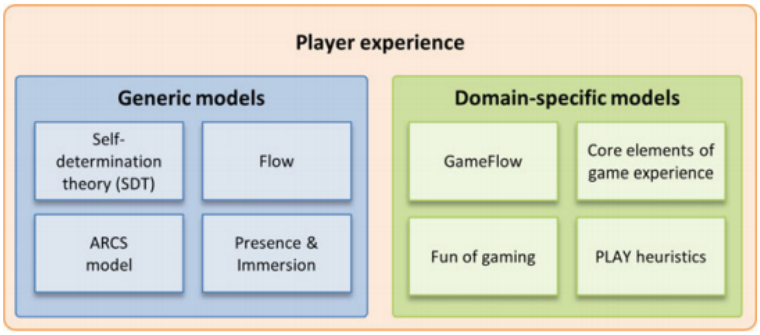

Figura 2.11: Modelli psicologici basati sull'esperienza del giocatore.

Oltre a questo, esistono altri modelli e teorie riconosciute in letteratura, quali: la *self-determination theory*, il modello di Denis e Jouvelot, la teoria del flusso, nello specifico il *dual-flow model* per gli exergame e il *GameFlow*, di cui parleremo più avanti nel paragrafo 2.2.4, il modello *ARCS*, il *Presence & Immersion*, il *Core elements of game experience*, il *Fun of gaming* ed, infine, il modello *Play heuristics* [16] [13].

La teoria self-determination di Deci e Ryan afferma che bisogna soddisfare certi requisiti, affinché un giocatore trovi dentro di sé la giusta "motivazione intrinseca" per applicarsi in un qualsiasi gioco. Questi requisiti essenziali sono i seguenti (Figura 2.12):

- *competence* (competenza), il bisogno di sentirsi capaci nelle attività che si eseguono;
- *autonomy* (autonomia), la consapevolezza di avere potere decisionale;
- *relatedness* (connettività), il bisogno di sentirsi socialmente connessi con le altre persone.

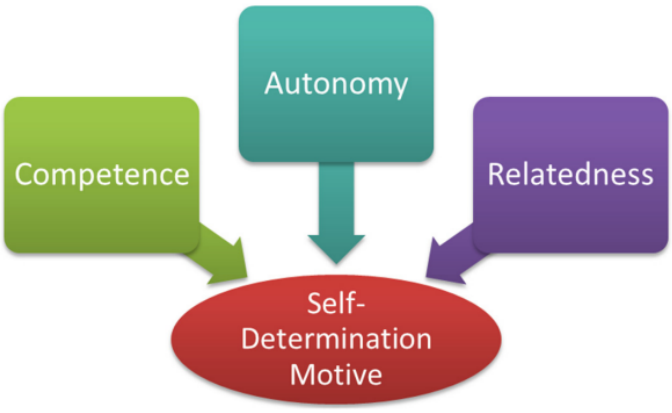

Figura 2.12: Schema dei tre bisogni a base della teoria self-determination.

Il modello di Denis e Jouvelot fa una classificazione dei tipi di motivazioni, basandosi sulla teoria di Deci e Ryan [17]. Queste, mostrate in Figura 2.13, sono le seguenti:

- "motivazione intrinseca", che si riferisce alla volontà di agire liberamente;
- "motivazione estrinseca", ossia i fattori esterni che spingono l'utente a eseguire il task;

- assenza di motivazione o *amotivation*.

Denis e Jouvelot costruiscono un modello dove, la motivazione intrinseca viene vista come una bilancia tra sfide, task e capacità dell'utente. Inoltre è possibile avere altre chiavi di lettura in base al semicerchio concentrico che si va a considerare: dall'esterno verso l'interno sono descritti stati emotivi, attività fisiche, risultati ed esiti del gioco.

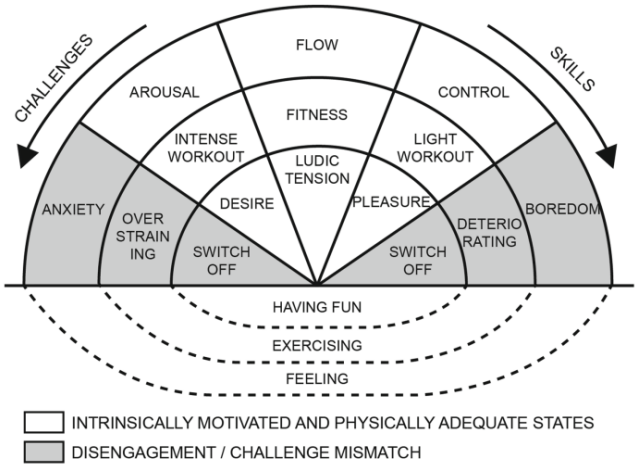

Figura 2.13: Modello di Denis e Jouvelot, dove le motivazioni intrinseche sono viste come una bilancia tra sfide e abilità.

Il modello ARCS, sviluppato da Keller, include quattro strategie principali per stimolare la motivazione: l'Attenzione, la Rilevanza, la Confidenza e la Soddisfazione (ARCS). L'attenzione è un fattore importante, poiché permette l'acquisizione e l'elaborazione delle informazioni, di cui un gioco ne è pieno. Senza l'attenzione un giocatore perde la cognizione di ciò che sta facendo e l'interesse per quest'ultimo. Per mantenere alto il grado di attenzione si possono inserire nel gioco eventi improvvisi, forti rumori o pause silenziose. La rilevanza o importanza,, consiste nel dare un senso e uno scopo al gioco dal punto di vista del giocatore affinché possa sin da subito riconoscere le funzionalità e gli aspetti principali del game. La confidenza è la sicurezza che l'utente possiede per completare in modo positivo il suo compito. Alti livelli di confidenza comportano un miglioramento delle capacità del giocatore ed una maggiore immersione. Infine la soddisfazione è il sentimento positivo che nasce dall'aver potato a termine la propria missione. Senza soddisfazione l'utente non troverebbe nessuna motivazione dentro di sè (motivazione intrinseca di Deci e Ryan) per applicarsi a un gioco.

Nel modello "Presence and Immersion" si definiscono due fattori: la presenza e l'immersione. La prima è uno stato d'animo dell'utente, che avverte di essere dentro il gioco, proprio in quello scenario, pur sapendo che è tutto artificiale (questo è tipico della realtà virtuale). L'immersione, invece, è un qualcosa di più sfaccettato, che porta a una perdita della consapevolezza di sè e la distorsione del tempo. Nel FUGA (Fun of Gaming), l'autore, basandosi su studi, interviste, questionari di gruppo, definisce vari fattori legati all'esperienza del giocatore: tensione, abilità, sfida, stato d'animo, effetti positivi e negativi, immersione. Nel theory of the Core Elements of the Gaming Experience (CEGE), due fattori essenziali per l'esperienza di gioco sono individuati: la *puppetry* e la *video-game perception*. La prima denota come il giocatore interagisce con il gioco, la seconda, invece, come l'ambiente di gioco influisce sull'esperienza del giocatore. Nel Play Heuristics, infine, viene proposto un framework per valutare la "giocabilità" di un gioco, in base a tre categorie: il gameplay, la sensazione di immersione e usabilità, e le meccaniche di gioco.

2.2.3 Classificazione

Come già detto nell'introduzione (paragrafo 2.2.1), gli health game abbracciano una vasta gamma di settori, dall'educazione alla medicina, puntando ad utenti eterogenei tra di loro. Come

nei serious game, anche nei health game esistono diversi approcci nella classificazione. Uno di questi definisce delle caratteristiche base, quali aria di applicazione, tecnologie di interazione, interfaccia grafica, numero di giocatori, genere di gioco. Altri approcci "top-down" definiscono una struttura basata sui tipi di health game (educativi, terapeutici, ecc.) e ambiti di applicazione (ricerca, pubblico, privato, ecc.), che ne facilitano la progettazione. Un esempio è la tassonomia suggerita da Sawyer e Smith, mostrata in Figura 2.14 [16].

Fields ->/Areas of application	*Personal*	*Professional/ practice*	*Research Academia*	*Public health*
Preventative	Exergaming stress	Patient communication	Data collection	Public health messaging
Therapeutic	Rehabilitainment disease management	Pain distraction cyber physiology disease management	Virtual humans	First responders
Assessment	Self-Ranking	Measurement	Inducement	Interface/Visualization
Educational	First aid medical information	Skills/Training	Recruitment	Management simulations
Informatics	Personal health records	Electronic health records	Visualization	Epidemiology

Figura 2.14: Tassonomia definita da Sawyer e Smith per gli health game.

2.2.4 Exercise game

Sebbene il temine exergame (EG) sia diventato di ampia diffusione, non esiste una vera e propria definizione accettata universalmente. In "Defining exergames & exergaming", Oh e Yang provano a porre rimedio, dando vita ad una loro definizione, partendo dai vari termini coniati nell'ambito della ricerca e della letteratura. Questa afferma quanto segue:

> *"An exergame is a video game that promotes (either via using or requiring) players' physical movements (exertion) that is generally more than sedentary and includes strength, balance, and flexibility activities [20]".*

Un exergame è, dunque, un videogioco che promuove il movimento e l'esercizio fisico, in contrapposizione alla sedentarietà, prevedendo attività di forza, equilibrio ed elasticità.

In "Exergaming and rehabilitation" [18], si afferma cheil problema terminologico nasce dal fatto che, un exergame abbraccia due aspetti duali tra loro, il gioco e l'esercizio, legandoli insieme. Ciò che riesce difficile è separare i due aspetti, analizzandone ciascuno a parte. Nonostante Oh e Yang abbiano portato maggiore chiarezza nell'ambito degli EG, la loro definizione non analizza bene sia l'interazione tra gioco ed esercizio e sia i due aspetti separatamente. Dunque, partendo dalla descrizione di esercizio ("Exercise is physical activity that is planned, structured, and repetitive for the purpose of conditioning any part of the body"), arrivano a coniare due termini per gli EG: il *Simple Exergame* e il *Therapeutic Exergame*, mostrati in Figura 2.15. Il primo afferma che:

> *"An exergame is an exercise with a game built into its structure."*

Questa definizione stabilisce un netto legame tra gioco ed esercizio, sottolineando la supremazia dell'ultimo sul primo. Il gioco non deve interferire con la corretta esecuzione dell'esercizio, ovvero l'esercizio è un qualcosa a sè stante, che rimarrebbe valido, anche nel caso in cui non sarebbe presente la componente ludica. Tutto ciò, però, comporta una serie di conseguenze sulla progettazione di un gioco: infatti, l'esercizio, che è lo scopo primario di un EG, detta quali debbano essere le meccaniche di gioco e ne limita, quindi, la libertà di espressione e di movimento. E' da questa osservazione che, pertanto, si arriva alla definizione di "Therapeutic Exergame", la quale afferma:

> *"A therapeutic exergame is an exergame that supports all primary and secondary goals defined for an exercise."*

Con i therapeutic exergame si ha una suddivisione dell'esercizio in scopi primari e secondari: i primi sono integrabili senza problemi con il gioco, i secondi sono relativi ad aspetti separati dal gioco, quali il controllo terapeutico. Nonostante la suddivisione, i due aspetti dell'esercizio devono e possono comunicare tra loro.

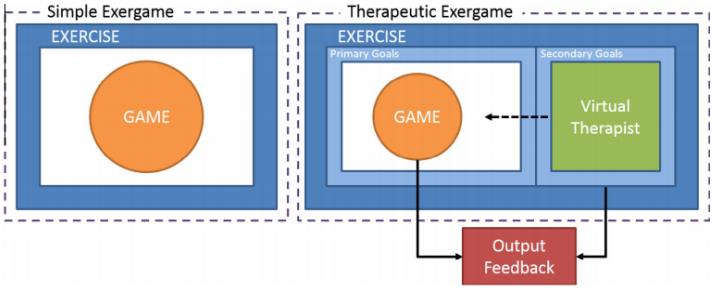

Figura 2.15: A sinistra è mostrato un simple exergame, dove il gioco si deve conformare alla struttura dell'esercizio. A destra, invece, è illustrato un therapeutic exergame, dove l'esercizio è diviso in scopi primari, legati al gioco, e scopi secondari, legati maggiormente all'aspetto serious dell'esercizio stesso.

In "Exergame development using the dual flow model" [19], l'exergame è descritto a partire dal punto di vista dell'esercizio e del gioco: il primo vede l'aggiunta del fattore di intrattenimento, come una spinta per il giocatore a rendere l'esercizio motivante, il secondo, vede l'inserimento dell'esercizio all'interno del gioco, come un'aggiunta di uno scopo serioso al puro divertimento. Siccome accade che, nella fase di progettazione, si possa tenere in considerazione solo uno dei due punti di vista, gli autori danno vita ad un nuovo modello per lo sviluppo, che unisce, sia la qualità del gioco e sia l'aspetto e il beneficio dell'esercizio. Questo è stato denominato *dual flow model*. Il modello dual flow prende spunto dal concetto di flusso (*flow*), concepito da Mihály Csíkszentmihályi. Il flusso, detto anche esperienza ottimale, in sintesi, è lo stato di totale coinvolgimento nello svolgimento di un'attività, ossia è quando una persona si sente totalmente immersa in essa. Csikszentmihalyi individua, dunque, dei fattori che sono alla base dell'esperienza di flusso:

- bilanciamento tra la sfida e le abilità dell'utente: l'attività non deve essere nè troppo facile nè troppo difficile;
- integrazione tra azione e consapevolezza: la persona si sente assorta, immersa nell'attività, tanto che i suoi movimenti appaiono naturali;
- obiettivi chiari: le aspettative e le regole devono essere comprensibili e l'obiettivo deve poter essere raggiungibile e adatto alle abilità della persona;
- feedback non ambigui: capire facilmente quando si ha successo o fallimento nello svolgimento di un'attività, in modo da applicare dei giusti miglioramenti;
- alto grado di concentrazioni solo ed esclusivamente su ciò che si sta facendo;
- la sensazione di avere il controllo sull'attività svolta e poterla dominare;
- perdita del senso di auto-consapevolezza, niente insicurezza, niente ego;
- alterazione della percezione dello scorrere del tempo;
- esperienza "autotelica", ossia che trova in se stessa, nella sua realizzazione, una soddisfazione, una gratificazione, una ricompensa.

Quindi il punto chiave dello stato di flusso è che in esso le abilità personali e le sfide proposte trovano la giusta combinazione, da rendere e mantenere l'attività interessante ed immersiva alla persona. Il concetto di flusso è stato successivamente applicato in diversi domini del mondo dei giochi: un esempio è il modello *gameflow* [21]. Questo ridefinisce i criteri di Csikszentmihalyi, per adattarsi meglio al contesto di gioco, come segue:

- concentrazione, presente sia nel gioco che nel giocatore;
- sfida, che deve essere un minimo impegnativa e combaciare con le abilità del giocatore;
- abilità del giocatore, che devono essere supportate nel miglioramento e nella padronanza del gioco;
- senso di totale controllo sulle azioni all'interno del gioco;
- obiettivi chiari nei momenti chiave del gioco;
- feedback sui progressi, obiettivi e sullo status del giocatore;
- immersione: il giocatore deve sentirsi coinvolto totalmente, perdendo la cognizione di tempo e di ciò che lo circonda, senza sforzi;
- interazioni sociale: la possibilità di poter comunicare, interagire e cooperare con persone dentro e fuori il gioco.

E prendendo spunto da questi concetti preliminari, che gli autori di [19] propongono il modello dual flow, illustrato in Figura 2.16 . Questo modello si basa su due caratteristiche fondamentali per avere un EG di successo: l'Attractiveness e l'Effectiveness. La prima è il fattore che motiva un utente a giocare senza smettere, la seconda stabilisce l'effettivo traguardo raggiunto per il proprio benessere.

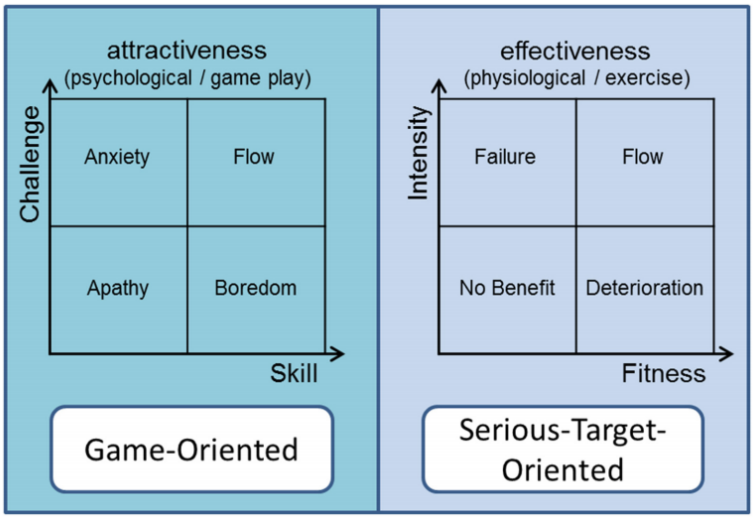

Figura 2.16: Dual flow model per gli Exergame.

Per entrambe le caratteristiche si hanno due sotto modelli, divisi in quattro quadranti, dove ognuno di essi rappresenta uno stato emotivo o fisiologico. L'Attractiveness descrive un modello dove si cerca un bilanciamento psicologico tra la difficoltà della sfida e le abilità del giocatore. In base al livello di difficoltà e alle capacità del giocatore, si avrà uno dei quattro stati d'animo del grafico. Un utente con scarse capacità rispetto alla sfida proposta, man mano che questa diventerà più complessa, passerà da uno stato di apatia ad uno di ansia, d'altra parte, chi possiede elevate qualità, percepirà, un gioco relativamente facile, sempre più noioso. Lo stato di flusso, di Csikszentmihalyi, è quello dove, la difficoltà del gioco si adatta alle capacità della persona. L'Effectiveness, invece, descrive un modello di bilanciamento fisiologico tra la prestanza fisica e l'intensità, ovvero la forza per portare a termine l'attività. In base alla forma fisica della persona e al livello di intensità del gioco, si avranno dei risultati più o meno positivi. Un giocatore, con qualità fisiche non adeguate all'intensità del task, non avrà alcun beneficio da esso o non sarà in grado continuarlo. D'altro canto, per chi ha una prestanza fisica superiore all'intensità di gioco, si può avere un deterioramento delle qualità fisiche. Anche qui lo stato di flusso è rappresentato dal caso in cui si ha un giusto bilanciamento tra l'intensità dell'esercizio e la forma fisica della persona.

Detto ciò, è possibile passare a descrivere come si articola la struttura di un exergame, che si basa sul modello dual-flow. Questa si suddivide in quattro componenti, descritte dallo schema in Figura 2.17.

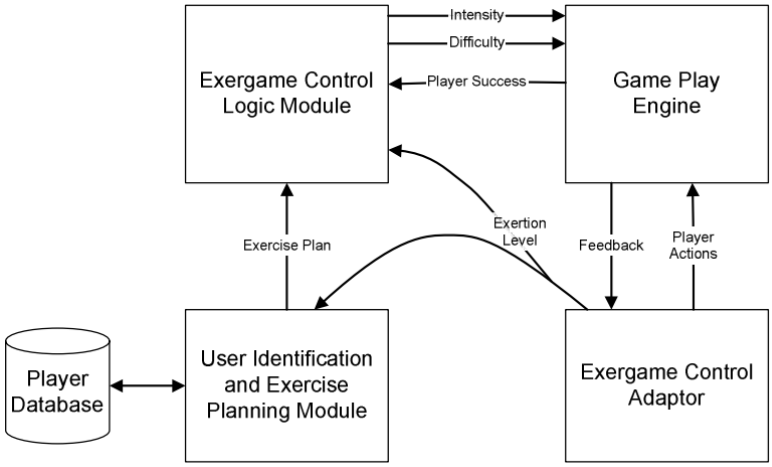

Figura 2.17: Struttura di un exergame basato sul modello dual flow.

Il modulo di User Identification and Exercise Planning prende in input informazioni sugli utenti, quali età, sesso, valori fisiologici, per pianificare la giusta serie di esercizi e identificare gli obiettivi a breve e lungo termine. Inoltre, serve anche a registrare uno storico delle prestazioni degli utenti per elaborare dati statistici e consentire di adattare gli esercizi successivi al grado di abilità raggiunte. Il modulo Exergame Control Logic corrisponde al cervello del sistema. Questo usa una serie di algoritmi per applicare il modello dual flow al gioco e gestisce l'intensità e la difficoltà, per mantenere il gioco interessante e realizzabile. Il modulo riceve in ingresso tre input, per raggiungere i suoi scopi: il piano di gioco, realizzato in precedenza, il livello corrente dello sforzo, impegno applicato dal giocatore e il suo stato di avanzamento (successo o fallimento) relativo all'esercizio corrente. Elaborati i tre input, il modello produce in output il delta di intensità e il delta di sfida, che rappresentano rispettivamente il valore positivo o negativo di quanto l'esercizio deve aumentare la sua intensità e difficoltà, per adattarsi allo status del giocatore. Il Game Play Engine rappresenta il cuore del sistema, che essenzialmente gestisce la creazione di esercizi e dei vari livelli di difficoltà. Spesso risulta difficile creare un buon game play in partenza, a causa della mancanza di informazioni sulla prestanza fisica e sulle capacità del giocatore. Per questo, in genere, si inizia il gioco a dei livelli di difficoltà di default, per poi man mano andare a regolarli in base alla situazione. L'Exergame Controll Adaptor, infine, gestisce il sistema di input dell'utente (tasti, pulsanti, gesti, ecc.) e il meccanismo di output per fornire una buona esperienza di gioco.

2.2.5 Esempi

In questo paragrafo verranno descritti brevemente alcuni dei giochi, lavori, fatti nell'ambito dei game for health, che hanno apportato sicuramente delle novità [16] [14] [13].

Re-Mission
Concepito da Pam Omidyar e progettato basandosi sulle ricerche del HopeLab Foundation, il gioco consiste in uno spara-tutto, che consente all'utente di entrare all'interno del corpo di un paziente, colpito dal cancro, per prendere parte alla battaglia contro le cellule malevole. Il giocatore inoltre monitora e riferisce lo stato di salute del paziente e ogni particolare sintomo al dottore capo, Dr. West. Ciascun livello è progettato per informare il giocatore sulla varietà dei trattamenti contro il cancro, come funzionano, e l'importanza di mantenere una giusta applicazione. Per ulteriori informazioni è possibile andare sul sito http://www.re-mission.net/.

CancerSpace
CancerSpace è un gioco che incoraggia un tipo di apprendimento diretto, presentando situazioni di vita reale. Il gioco è ambientato all'interno di una clinica, dove lo scopo del giocatore è affrontare le malattie dei vari pazienti, confrontandosi con lo staff e con tutto ciò che è presente in letteratura. E' possibile seguire passo dopo passo la situazione clinica del paziente, osservando le conseguenze di ciascuna decisione presa.

Figura 2.18: Immagini prese da CancerSpace (in alto) e Re-Mission (in basso).

BalanceFit - Balance, Coordination and Strength Training
BalanceFit riprende tutti quei giochi ambientati all'interno di labirinti. L'obiettivo, del giocatore è di pilotare una palla all'interno della scena, fino ad uno specifico target. Per controllare la sfera, mostrata sullo schermo, l'utente deve muovere il suo centro di pressione, spostando il peso del corpo sopra una Nintendo Wii Balance Board. Per pazienti, che non amano stare in piedi o che hanno problemi fisici, è possibile aggiungere delle sbarre laterali. Il gioco fornisce, inoltre, un tool di configurazione per adattare l'esperienza di gioco al tipo di utente. Analisi qualitative hanno sottolineato, come lo stile di visualizzazione e la sensibilità della balance, giocano un ruolo importante per l'accessibilità di tutto il sistema. Infatti, regolando questi parametri, si consente a chi ha problemi fisici, come ipovisione e invalidità, di poter partecipare. Per approfondire è possibile visitare le pagine `http://www.spielend-fit.de` e `http://www.kom.tu-darmstadt.de`.

Figura 2.19: Balance Fit: da sinistra verso destra, il menu principale, il tool di configurazione, un livello di gioco e il set-up del gioco.

NeuroVitAALis - Personalized Cognitive Training
NeuroVitAAlis è un training scientifico per persone con problemi di salute, demenza, handicap cognitivi. Il gioco consiste in un programma di allenamento di sei settimane, con tre sessioni a settimana, ciascuna di quaranta minuti. Il programma include cinque esercizi complessi, con differenti difficoltà. L'utente viene monitorato continuamente in modo da adattare i

task alle prestazioni personali. Il programma si suddivide in esercizi di memoria, navigazione, riconoscimento forme e di linguaggio.

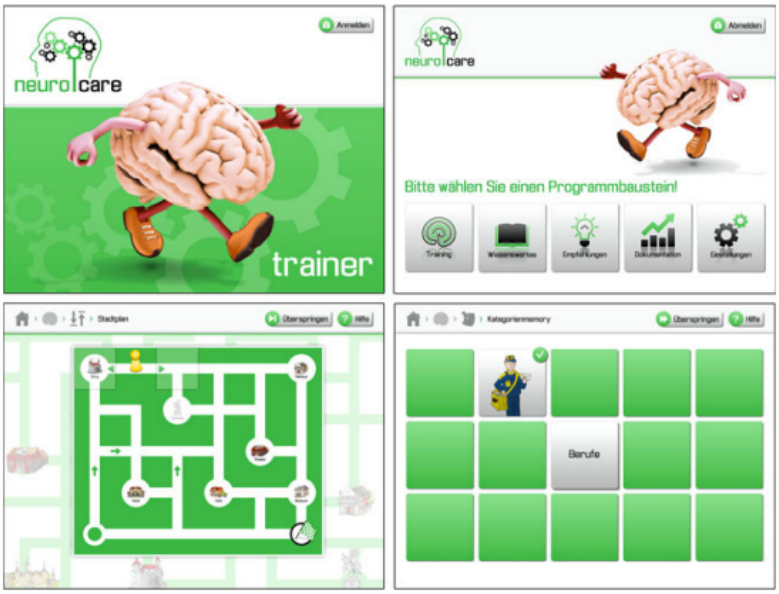

Figura 2.20: Immagini dal gioco NeuroVitAALis, sviluppato per aiutare le persone con problemi di cognizione, attraverso un programma di esercizi di vario genere.

2.3 Robotic game

In questo paragrafo introdurremo una nuova tipologia di giochi, i robotic game, ossia la possibilità di inserire in un contesto ludico o serious degli agenti robotici autonomi. Tratteremo del concetto dei "Physically Interactive Robogames" (PIRG), e delle linee guida per la progettazione di giochi robotici. Infine, descriveremo brevemente diversi lavori correlati a questo ambito.

2.3.1 Introduzione

Il concetto di videogame negli ultimi anni si sta evolvendo: non si ha più l'idea di avere un giocatore, seduto, di fronte a uno schermo. In pratica si sta rompendo quella barriera virtuale tra gioco e giocatore, facendo sì che quest'ultimo possa vivere un'esperienza di gioco reale, immersiva, in un ambiente tridimensionale, quale la sua camera, il salotto di casa, e non più in un contesto bidimensionale (schermo), dando così la possibilità al giocatore, di interagire con oggetti fisici, sia telecomandati che autonomi. E' proprio in questo contesto che si introducono i giochi robotici e le varie metodologie, linee guida, per progettarli e svilupparli.

Da "Physically Interactive Robogames: Definition and design guidelines" [22] è presente la seguente definizione dei PIRG:

> *"A Physically Interactive RoboGame consists of a number of autonomous agents (including software, hardware, and physical agents) of which at least one is an autonomous robot, and one is a person. These agents interact with each other in a possibly variable and unknown environment, by following some game rules, so that the human players can have fun."*

Dunque, in un gioco PIRG esiste un'interazione tra uno o più agenti autonomi, di cui almeno uno deve essere un robot e un'altro una persona. Questa interazione può essere di diverso tipo, una cooperazione o una competizione, comunque non bisogna mai perdere di vista lo scopo

principale del gioco, divertire ed intrattenere. Questo non vuol dire che i robotic game non possano essere applicati in altri ambiti, quali i serious game, gli exergame. Inoltre da un diverso punto di vista è possibile definire i PIRG come un estensione dei videogiochi classici, ossia il robot sostituisce la console di gioco. Pertanto, i robot, citati, non devono essere prodotti particolari, chissà di quale complessità o costo, ma oggetti commerciali presenti negli scaffali di negozi di vario genere, ed inseriti in un ambiente di gioco, che può essere di qualsiasi tipo, ad esempio un contesto familiare. A questo punto, è possibile passare a descrivere le varie linee guida per la realizzazione di un gioco robotico.

2.3.2 Linee Guida nei PIRG

Queste linee guida nascono dalla lunga esperienza di gioco e progettazione di giochi, ed includono tutti i vari aspetti di un gioco, come ambientazione, personaggi, storia, interazioni, intrattenimento [22].

- Define a story for the game and stick to it
  Bisogna definire una storia chiara, che giustifichi gli obiettivi, i ruoli e le regole del gioco. La storia deve essere di facile comprensione, ma allo stesso tempo deve stimolare il giocatore. Questo deve conoscere sin dall'inizio il suo ruolo nella storia, le azioni che può fare e gli obiettivi da raggiungere. Inoltre, è possibile inserire elementi di gioco familiari, sfide, attività di vario genere, che però siano sempre adatte alle capacità del giocatore.

- R^3, or Reduce, Reuse, Recycle
  Dal momento che si vuole realizzare un prodotto che punta a un pubblico di massa, a un mercato commerciale, non si possono utilizzare componenti costose e di alta qualità, ma è necessario mantenersi ad un prezzo accessibile a tutti. Il concetto della Reduce, quindi, afferma che per ottenere un prodotto finale ad un prezzo basso, non si deve ambire a raggiungere soluzioni ad alte prestazioni e ottimali, ma a scendere a un livello minimo di qualità, che comunque soddisfi e diverta il giocatore. I concetti di Reuse e di Recycle,invece, suggeriscono di utilizzare prodotti, presenti già in commercio, ed inserirli nel contesto di gioco, dandogli così un nuovo scopo, una nuova vita.

- Play it safely
  Interagire in un cotesto reale con oggetti fisici, quali i robot, può comportare a dei rischi per la sicurezza e la salute dei giocatori che non vanno assolutamente presi sotto gamba.

- KISS: Keep It Stupid Simple
  Non si deve dimenticare che i giochi robotici sono indirizzati a un pubblico generico, bambini, adulti, persone comuni con tanta o poca esperienza di gioco o con nessuna abilità. Quindi, è necessario rendere il tutto semplice, di facile comprensione: il gioco dovrebbe avere poche istruzioni, un manuale chiaro, settaggi comprensibili, niente messaggi criptici, ecc.

- Test the assumptions
  Prima ancora di far uscire il prodotto finale è bene che tutto ciò, che sia stato pensato, ideato e progettato, vada testato con un giusto gruppo di utenti, in un contesto reale di gioco.

- Do it for the fun
  Alla fine di tutto, non bisogna dimenticarsi che il gioco nasce per intrattenere e divertirsi. Spesso ci si dimentica di questa componente fondamentale che deve essere una delle linee guida principali per realizzare un buon prodotto.

- Robot as a rational agent
  E' necessario che i robot possano dare i giusti feedback e apparire negli occhi del giocatore come dei veri e propri agenti razionali, sia che siano avversari che compagni di squadra. In sintesi, la presenza del robot non deve passare in secondo piano: infatti, nessuno vuole giocare insieme o contro uno giocatore incapace. Ogni aspetto e limitazione del robot deve essere una caratteristica sensata, che ben si adatta alla tipologia di gioco.

- Sense exploitation
  Dal momento che l'utente verrà inserito in contesto reale, tridimensionale, bisogna offrire un'esperienza sensoriale, non solamente di un unico senso, quale la vista o l'udito, ma èdoverso stimolare e coinvolgere più sensi del corpo e anche la gestualità ed i movimenti.

- Agile Implementation
  La progettazione di un PIRG non può essere fatta secondo una metodologia a cascata, passo dopo passo, ma bisogna porsi nella maniera che ad ogni fase di progettazione si debba o possa tornare indietro e ripartire anche da zero.

2.3.3 Lavori correlati

Nel seguito vengono illustrati una serie di lavori correlati all'ambito dei robotic game.

Jedi Trainer
Il progetto cerca di applicare nei suoi aspetti tutti i punti descritti nel paragrafo [22]. Il gioco ruota intorno ad una storia semplice ed efficace: infatti, vuole ricreare la scena di "Star Wars Episodio IV", in cui Luke Skywalker si esercita nell'uso della spada laser con un apposito drone. Per rimanere fedeli al concetto del R^3, è stato scelto, come agente autonomo, il Parrot ARDrone. Questo è un prodotto facilmente trovabile in commercio, a poco prezzo, ed è dotato di una telecamera frontale, capace di trasmettere immagini QVGA (320x240 pixel) e una batteria dalla durata di 15 minuti. Inoltre, essendo un drone certificato e testato, garantisce anche la sicurezza del giocatore. Per quanto riguarda l'ambiente di gioco non ci sono grossi vincoli, poiché in caso contrario si rischierebbe di rendere l'esperienza ludica noiosa. Quindi, l'utente può scegliere dove più preferisce giocare, rispettando solo l'unico vincolo, di mantenere una certa distanza dal drone per la propria sicurezza. Il gioco si articola in questo modo: il giocatore, libero di muoversi all'interno della scena, deve pararsi dai colpi del drone con un'apposita spada laser. In base ai colpi parati e non, si ha il guadagno di certo punteggio a favore di uno dei due sfidanti. Per calcolare il punto si va ad analizzare il frame di sparo e si valuta la percentuale di corpo protetta dalla spada laser: se è sopra una certa soglia il punto va al giocatore, in caso contrario, è stato colpito. Il drone, per sembrare un agente autonomo razionale, si muove nella scena intorno al giocatore, cambiando talvolta la sua direzione e mantenendo una distanza costante. Per riconoscere il giocatore, quest'ultimo impugna un Pool Noodle (tubo ausiliare usato nelle piscine): infatti, essendo più spesso di una spada laser, facilità, dunque, il processo di image recognition, senza però levare la sensazione di maneggiare una vera arma jedi. In aggiunta, il giocatore indossa un'abito dal colore uniforme per facilitare ulteriormente il processo di riconoscimento. Per dare il segnale al giocatore, che il drone sta per attaccare, questo, prima di uno sparo, esegue un'animazione ed emette un certo suono. Infine, è possibile giocare a diversi livelli di difficoltà ed immergere maggiormente il giocatore nella scena del film, coprendogli gli occhi con un caschetto, che lo costringe ad affidarsi solamente sul suo udito.

Figura 2.21: In Figura si osservano due fasi di gioco: a sinistra il giocatore fronteggia il drone, a destra si mette in posizione di parata. In basso si vede come il drone processa le immagini della camera, realizzando una classificazione in base al colore, per il riconoscimento del giocatore e della sua posa.

Hit the answer to make NAO happy
In [23] propongono un gioco educativo per bambini con la presenza di un robot umanoide, "NAO". Sviluppato dalla compagnia francese Aldebaran, Nao è un robot alto 57cm con 25 gradi di libertà, dotato di vari sensori, che gli permettono di eseguire movimenti del corpo, inclusi gli occhi, riconoscere gesti, ricevere ed emettere segnali audio, registrare video, controllare colori led. All'interno del gioco il robot ricopre il ruolo di tutor,insegnante: ad ogni fase propone ai bambini una serie di domande di diversa difficoltà, facile, media e difficile. In base al tipo di risposta, esegue una serie di azioni: se è esatta alza le braccia, fa un occhiolino, si alza in piedi, mentre, in caso di risposta sbagliata, si siede ed emette una luce rossa dagli occhi. Il suo scopo è quello di trasmettere ai bambini delle emozioni correlate alle risposte, quali felicità e delusione. I bambini, dunque, hanno il compito di rispondere bene ai quesiti proposti, facendo si che il robot arrivi allo stato di felicità (NAO in piedi).

Figura 2.22: Il robot umanoide Nao in attesa di iniziare a giocare a "Hit the answer to make NAO happy".

GENTORO
In "GENTORO" lo scopo del gioco è quello di sviluppare le capacità dei bambini, quali linguaggio, comunicazione, logica ed immaginazione [24]. Per raggiungere questo traguardo i bambini creano storie originali e le racconkso dinamicamente all'interno di un spazio di gioco fisico, usando un proiettore portatile e collaborando con un robot. La novità del gioco sta nel fatto che l'ambiente unisce caratteristiche reali e virtuali, e che i bambini possono partecipare attivamente allo svolgimento delle loro storie interagendo con il robot, che si comporta come uno degli attori della storia creata.

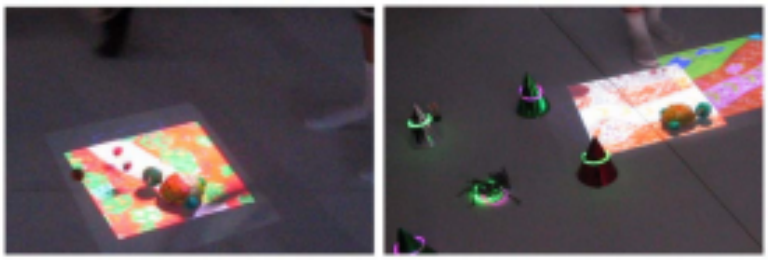

Figura 2.23: GENTORO supporta i bambini nello sviluppo di una storia in un spazio fisico immersivo, grazie ad un proiettore mobile e un robot.

PiTanks
"PiTanks" è un gioco multiplayer che fa uso di robot ed immagini proiettate. Lo scopo del lavoro è quello di creare una piattaforma di realtà mista, dove i giocatori possono scontrarsi tra di loro, pilotando, tramite un controller, un robot "Polulu 3Pi". L'utilizzo di una camera permette di acquisire delle istantanee della scena proiettata, informando il sistema della posizione fisica corrente dei robot, grazie all'uso di marker, e dando la possibilità di aggiornare lo stato della partita. E' possibile settare varie caratteristiche del gioco, quale, il numero di giocatori (fino ad un massimo di otto), modalità di gioco (Timed Match e Last Team Standing) e il tipo di mappa (predefinita o creata sul momento) [25].

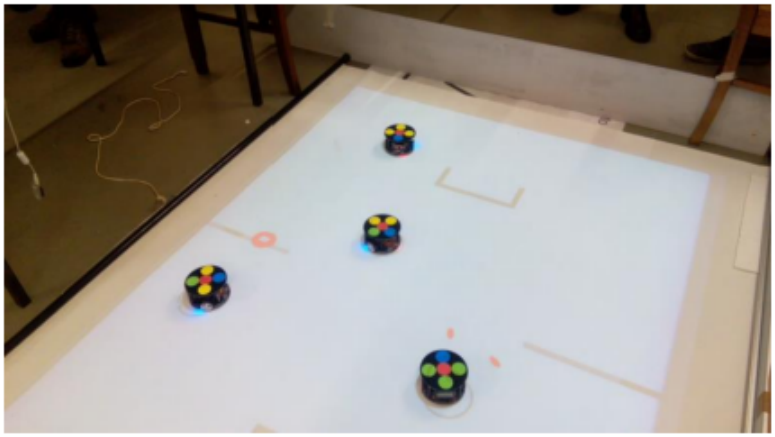

Figura 2.24: Sessione di gioco "PiTanks".

Cellulo
In [26], gli autori presentano "Cellulo", una nuova piattaforma robotica da applicare in campo educativo. Partendo da alcune considerazioni in ambito scolastico, definiscono tre fattori essenziali alla base del progetto: l'ubiquità, la versatilità e la praticità. Queste vanno a descrivere un sistema che sia affidabile, sostituibile, intuitivo, facile da usare, applicabile in più settori disciplinari, e flessibile, ossia che possa essere usato da dei bambini senza ricorrere a rischi e senza vincoli. Da queste premesse sviluppano una piattaforma, che ha lo scopo di presentare alla classe una serie di attività di apprendimento, ognuna delle quali è illustrata al di sopra di larghi fogli di carta, facili da stampare in ogni luogo (casa, ufficio, scuola). Al di sopra di questi fogli operano, poi, una serie di robot "Cellulo" (Figura 2.25), a basso costo, tangibili e portabili. Questi, possono muoversi nella scena (foglio) in modo autonomo, interagire con gli studenti e gli insegnanti, reagire in base agli input che ricevono ed inviare feedback tattili. In aggiunta, tutti i robot sono connessi tramite Bluetooth ai diversi dispositivi cellulari, che hanno lo scopo di coordinare i loro movimenti e il tipo di attività, dando anche l'opzione di fornire al sistema comportamenti ed input dinamici. I robot sono provvisti anche, di un dispositivo per auto localizzarsi all'interno del foglio, di sei bottoni capacitativi retroilluminati e della capacità di muoversi liberamente in ogni direzione.

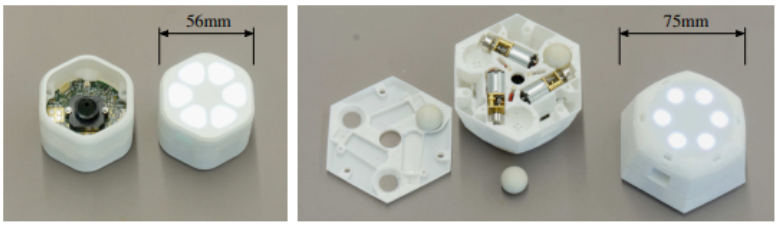

Figura 2.25: Due immagini del robot "Cellulo", dove si notano il sistema ottico (al centro) e di movimento (ruote sferiche).

Un esempio di applicazione della piattaforma è il gioco "Treasure Hunt", sviluppato dagli stessi autori di [26]. In questo caso di studio, il robot assume il ruolo di oggetto passivo, per essere manipolato dai bambini nelle varie attività da eseguire. Lo scopo della caccia al tesoro è di far esplorare diverse interazioni della piattaforma ai bambini. Queste sono caratterizzate da vari task, quali:

- posizionare il robot in una zona "attiva" per far iniziare il gioco;
- assegnare al robot un personaggio (pirata);
- riprodurre in parallelo con altri bambini una sequenza di pulsanti lampeggianti;
- cercare il tesoro, posizionando il robot nella scena, facendo attenzione ai "raggiri";
- ruotare il robot per recuperare il tesoro;
- far muovere il robot attraverso una serie di percorsi difficili.

Capitolo 3

Tecnologie

In questo capitolo saranno introdotte le tecnologie, hardware e software, considerate nel lavoro di tesi.

3.1 Hardware

3.1.1 Jumping Sumo

La scelta di adoperare questo tipo di robot, il Jumping Sumo, è stata ponderata su due fattori principali, uno più tecnico, l'altro più metodologico. Dal momento che, tra i punti del lavoro di tesi, c'era l'idea di accessoriare un robot con uno, due dispositivi, tra cui un tracker, era, dunque, necessario selezionarne uno, capace di sostenere i vari accessori, senza perdere potenza motoria e funzionalità. Inoltre, riprendendo i punti delle linee guida PIRG, (paragrafo 2.3.2), è stata posta l'attenzione sul principio del R^3, ovvero riutilizzare un prodotto presente sul mercato, ad un prezzo accessibile a tutti, e dargli un nuovo scopo, una nuova "vita".

Sviluppato dalla compagnia francese Parrot, il Jumping Sumo (Figura 3.1) è descritto come un robot agile, veloce, rapido e solido [27]. Dal peso di soli 80 grammi e dalle piccole dimensioni (ruote aperte 185x150x110 mm, ruote chiuse 143x150x110 mm), Il Jumping Sumo è manovrabile in diversi ambienti, sia interni che esterni. Tra le caratteristiche principali del robot, si ha una buona tenuta di strada a 360°, rotazioni rapide a 90 e 180 gradi, una velocità massima di 2m/s (7km/h) e una telecamera grandangolo. Provvisto di accelerometro e giroscopio, ha la possibilità di cambiare l'assetto delle ruote, aperte o chiuse, trasformando la tenuta di strada da più rapido e agile, a più stabile e sicuro. Oltre alla capacità di compiere scatti veloci e virate, il robot è un bravo acrobata: infatti, sa saltare in altezza e in lunghezza fino a 80cm e rimanere in equilibrio, grazie alla potenza delle sue molle posteriori. In aggiunta, è abile nell'eseguire diverse animazioni, quali slalom, vortici, rotazioni. Non bisogna dimenticarsi della modalità full-immersion della camera integrata, che consente di catturare ed inviare in streaming immagini e video da 640x480 pixel (VGA), a 15 frame al secondo. Il Jumping Sumo è capace anche di emettere suoni e luci, che comunicano all'utente il suo stato d'animo.

Il controllo del robot avviene grazie all'applicazione "FreeFlight3", installabile su qualsiasi dispositivo, smartphone e tablet, con Android, Apple iOS o Windows Phone. L'applicazione, connessa tramite la Wi-Fi a 2.4 o 5 GHz, consente all'utente di pilotare e guardare il mondo dal punto di vista del Jumping Sumo (camera) in tempo reale, fino a una distanza massima di 50 metri all'aperto. E' possibile, emettere anche suoni, compiere animazioni, acrobazie e soprattutto pianificare il percorso e i movimenti del robot, con la modalità "RoadPlan". Ogni percorso creato, video o immagine catturata, è salvata nella memoria interna del robot, accessibile grazie al micro-cavo USB di tipo A. La batteria al litio consente un'autonomia di circa 20 minuti ed una ricarica completa in 90 minuti.

Figura 3.1: Parrot Jumping Sumo.

Provvisto di un sistema operativo Linux, il Jumping Sumo è anche programmabile. Infatti, la Parrot consente agli sviluppatori di usare l'SDK[1] di FreeFlight3, che fornisce librerie per sistemi Unix, Android e iOS [28]. In aggiunta, è consentito accedere al protocollo della SDK e realizzare una propria libreria di controllo, in diversi linguaggi di programmazione [29].

Infine, per i più appassionati è possibile personalizzare il Jumping Sumo con accessori, guarnizioni, adesivi, controller e approfondirne le modalità d'uso sulla guida online [31].

3.1.2 HTC Vive

Come accennato nel paragrafo precedente, nel lavoro di tesi è previsto l'utilizzo di uno o più dispositivi di tracciamento. A tale scopo è stato concordato di adoperare l'insieme di dispositivi e accessori "Vive", sviluppati dalla "HTC"[2]. Il motivo di tale decisione nasce dal fatto, che i prodotti Vive fanno parte di un progetto più ampio, lo "SteamVR". Quest'ultimo, consiste nella realizzazione di una piattaforma hardware e software, ideata dalla "Valve Corporation"[3] in collaborazione con l'HTC. L'aspetto hardware della piattaforma è stato realizzato dalla HTC, mentre, la Valve ha rilasciato una SDK, l' "OpenVR", per supportare lo sviluppo software di applicazioni che fanno uso, non solo dell'hardware SteamVR, ma realizzato anche da altre società. Inoltre, il progetto prevede anche il supporto nativo per Unity Engine, di cui parleremo nel paragrafo software 3.2. Tutti questi aspetti, dunque, ci hanno portato ad utilizzare il Vive, poiché evidenziano come la piattaforma SteamVR faciliti lo sviluppo di un lavoro che riguarda il campo della realtà, sia virtuale che mista. Inoltre, il Vive fornisce un tracciamento di tipo

[1] Un software development kit (SDK), in informatica, indica genericamente un insieme di strumenti per lo sviluppo e la documentazione di software [30].

[2] HTC, precedentemente conosciuta come "High Tech Computer Corporation", è una compagnia di Taiwan, produttrice di smartphone [33].

[3] La Valve Corporation è una software house (azienda specializzata) di videogiochi, fondata nel 1996 da Gabe Newell e Mike Harrington, con sede a Bellevue, Washington [32].

room-scale, cioè consente di replicare i movimenti fisici dell'utente all'interno di una scena3D dedicata, simulando la realtà fisica, in sicurezza.

Figura 3.2: HTC Vive Vr System: a sinistra il visore, i due controller e le due base station, a destra il tracker.

I componenti principali del sistema Vive sono il visore, i controller e le base station, mentre, il tracker è un accessorio aggiuntivo (Figura 3.2) [35] [36]. Il visore, che permette l'immersione visiva nella realtà virtuale, fornisce un campo visivo di 110°, una camera frontale per rilevare ostacoli e muri, una risoluzione di 2160x1200 pixel, con un refresh rate di 90Hz e 32 sensori per il tracciamento della testa. I controller wireless sono provvisti di un feedback aptico, di vari pulsanti di input (dual-stage trigger, grip, pad) e 24 sensori infrarossi, per il tracciamento delle mani. Le due base station servono a creare la stanza virtuale e a tracciare i dispositivi Vive all'interno di essa, grazie all'emissione di impulsi infrarossi. Infine, il Vive tracker è un accessorio che permette di tracciare i movimenti di oggetti o parti del corpo (braccia, gambe, petto) a cui è applicato, sempre all'interno della scena. Questo è provvisto, di sensori di tracking per la posizione e l'orientamento, di luci led e di un connettore. Quest'ultimo grazie ai 6 pin di cui è composto permette di integrare il tracker con altri accessori Vive (ad esempio l'Hyper Blaster https://www.vive.com/us/VR-hyperkin-hyper-blaster-with-tracker/). Questa tecnica consente di immergere altri dispositivi all'interno del mondo virtuale ed aumentare l'esperienza immersiva dell'utente. A differenza dei controller tutti i dati e le informazioni del tracker non sono inviate al visore, ma al dongle, un dispositivo collegato direttamente al pc, tramite porta usb 2.0 [37].

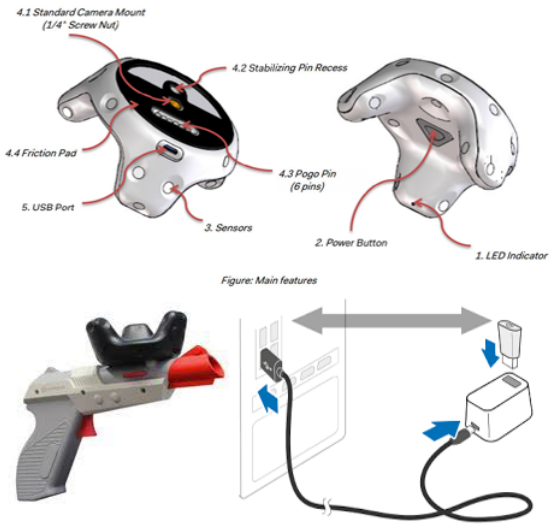

Figura 3.3: In altro: una descrizione dei componenti del Vive Tracker. In basso: a sinistra il tracker integrato con un dispositivo Hyper Blaster, a destra il dongle per inviare i dati del tracker al pc.

3.1.3 Cassa Bluetooth

Come ultimo elemento hardware è stata aggiunta una piccola cassa Bluetooth al di sopra del Jumping Sumo, per ricevere segnali audio dall'applicazione e riprodurli.

Figura 3.4: Cassa Bluetooth della Timbre

3.2 Software

3.2.1 Libreria Jumping Sumo

Per comunicare ed inviare comandi al Jumping Sumo, è stata sviluppata una libreria Java[4]. Questa fa uso dei metodi e delle classi di un'altra libreria [38], realizzata dalla "Devoxx4kids"[5], che implementa il protocollo di comunicazione del Sumo, descritto in [29]. Quest'ultimo, usato nella sdk ufficiale della Parrot, permette di creare un proprio framework di comunicazione, non solo per il Sumo, ma anche per altri robot e droni della compagnia. Il protocollo, suddiviso in diverse sottoparti, specifica nei dettagli come bisogna connettersi al robot, scambiare messaggi e quant'altro. Ogni pacchetto è di tipo binario, con un'ordinamento di tipo "Little Endian"[6]. Per poter aprire una comunicazione con il robot, è necessario avviare un handshake TCP[7] ad una specifica porta, tramite la Wi-Fi. Se l'operazione va a buon fine, si ricevono informazioni per poter aprire una comunicazione UDP[8]. Tramite la socket è possibile inviare e ricevere dati, sia per comandare il robot e sia per ottenere feedback, per quanto riguarda lo status del robot stesso. La lista dei comandi del Jumping Sumo è visualizzabile al link `https://github.com/Parrot-Developers/arsdk-xml/tree/master/xml`. I comandi, che sono stati adoperati per l'applicazione sviluppata, sono quelli che riguardano il pilotaggio del robot. Per pilotarlo esiste un unico comando (PCMD), in cui bisogna specificare due valori, la velocità

[4] Java è un linguaggio di programmazione ad alto livello, orientato agli ogetti [40].

[5] Devoxx4kids è un'organizzazione belga, il cui scopo è di incentivare la creatività dei bambini in ambito tecnologico e di insegnargli la programmazione in modo divertente [39].

[6] Modalità usata dai calcolatori per immagazzinare in memoria dati di dimensione superiore al byte, dal byte meno significativo al byte più significativo [41].

[7] Il Trasmission Control Protocol (TCP) è un protocollo di rete a pacchetto di livello di trasporto, appartenente alla suite di protocolli internet, che si occupa di creare una comunicazione affidabile tra mittente e destinatario [42].

[8] Lo User Datagram Protocol (UDP) è uno dei principali protocolli di trasporto della suite di protocolli Internet, rapido ma non affidabile [43].

e la rotazione. Questi input, tuttavia, non hanno una corrispondenza diretta con l'effettive variabili che si vogliono pilotare. Nello specifico, non è possibile indicare al Sumo a che velocità in metri al secondo andare e di quanti gradi ruotare, ma è necessario stabilire un valore in un intervallo da -100 a 100. Tutto ciò presuppone, dunque, la necessità di definire un qualche tipo di controllore (paragrafo 3.2.3), per pilotare il robot nella giusta direzione e nella posizione desiderata.

3.2.2 Unity3D Game Engine

Unity3D è un motore grafico multipiattaforma, sviluppato dalla "Unity Technologies" [48]. Progettato per creare principalmente videogiochi sia 3D che 2D, Unity consente la realizzazione di applicazioni per diverse piattaforme, quali Microsoft, WebGL, iOS, Linux, ecc. Il motore gestisce tutti i vari aspetti di un'applicazione grafica: la renderizzazione dei contenuti 3D/2D, la fisica e le collisioni nel mondo virtuale, l'audio e il video, l'animazione, l'intelligenza artificiale, la creazione di connessioni di rete, i particellari, la modellazione di mesh.

Lo sviluppo di un'applicazione/videogioco è supportato dall'editor grafico integrato. Ogni gioco si suddivide in più unità base, la scena, che rappresenta l'ambiente di gioco 3D/2D. Ogni scena può essere popolata da molteplici elementi, oggetti, detti "GameObject". Un GameObject è essenzialmente un contenitore, che è possibile "riempire" con una serie di componenti, che ne vanno a definire il comportamento, il fine, la rappresentazione grafica, le proprietà e la relazione con l'ambiente circostante. Ad un gameobject è possibile associare un modello, una mesh, con una dato materiale, e un componente per gestire le collisioni e la fisica. Ciascuno di questi componenti non sono altro che script, pezzi di codice interpretati, tanto è vero che Unity permette di gestire le dinamiche, la logica di gioco attraverso la scrittura di script personalizzati, in C#[9] o JavaScript[10] , tramite la piattaforma Mono/.NET[11]. Ciascun unity script, per essere associato ad un oggetto della scena, deve ereditare da una classe base, "Monobehaviour". Questa classe espone una serie di funzioni evento, che vengono chiamati dal motore grafico al verificarsi di determinate condizioni. Dunque, durante l'esecuzione dell'applicazione, Unity scorre i vari script attivi nella scena per controllare se uno di questi implementi una delle funzioni evento di Monobehaviour, eseguendole nel caso in cui ci sia un riscontro positivo. Tutti gli eventi vengono eseguiti secondo un preciso ordine di esecuzione, ben illustrato in Figura 3.5. Unity consente anche, di scaricare, da uno personale store online, una serie di pacchetti (gratis e a pagamento), contenenti asset (materiali, texture, gameobject, ecc.), e di importare all'interno dell'editor delle proprie risorse. In più è presente una community online ricca di tutorial per gli sviluppatori.

Infine Unity offre un plugin per la libreria SteamVR, che, da quanto accennato in precedenza, ci servirà per gestire i dispositivi di tracking dell' HTC Vive. In conclusione tutte queste caratteristiche, la portabilità, lo sviluppo di una logica di gioco dinamica, la community, le librerie dello store, ci hanno spinto a sviluppare un'applicazione con questo motore grafico.

[9] Linguaggio di programmazione, orientato agli oggetti, sviluppato da Microsoft [44].

[10] Linguaggio di programmazione, orientato agli oggetti, interpretato, usato specialmente nell'ambito Web [45].

[11] MonoDevelop è ambiente di sviluppo multipiattaforma, OpenSource [46]. .NET è una piattaforma di sviluppo, realizzata dalla Microsoft [47].

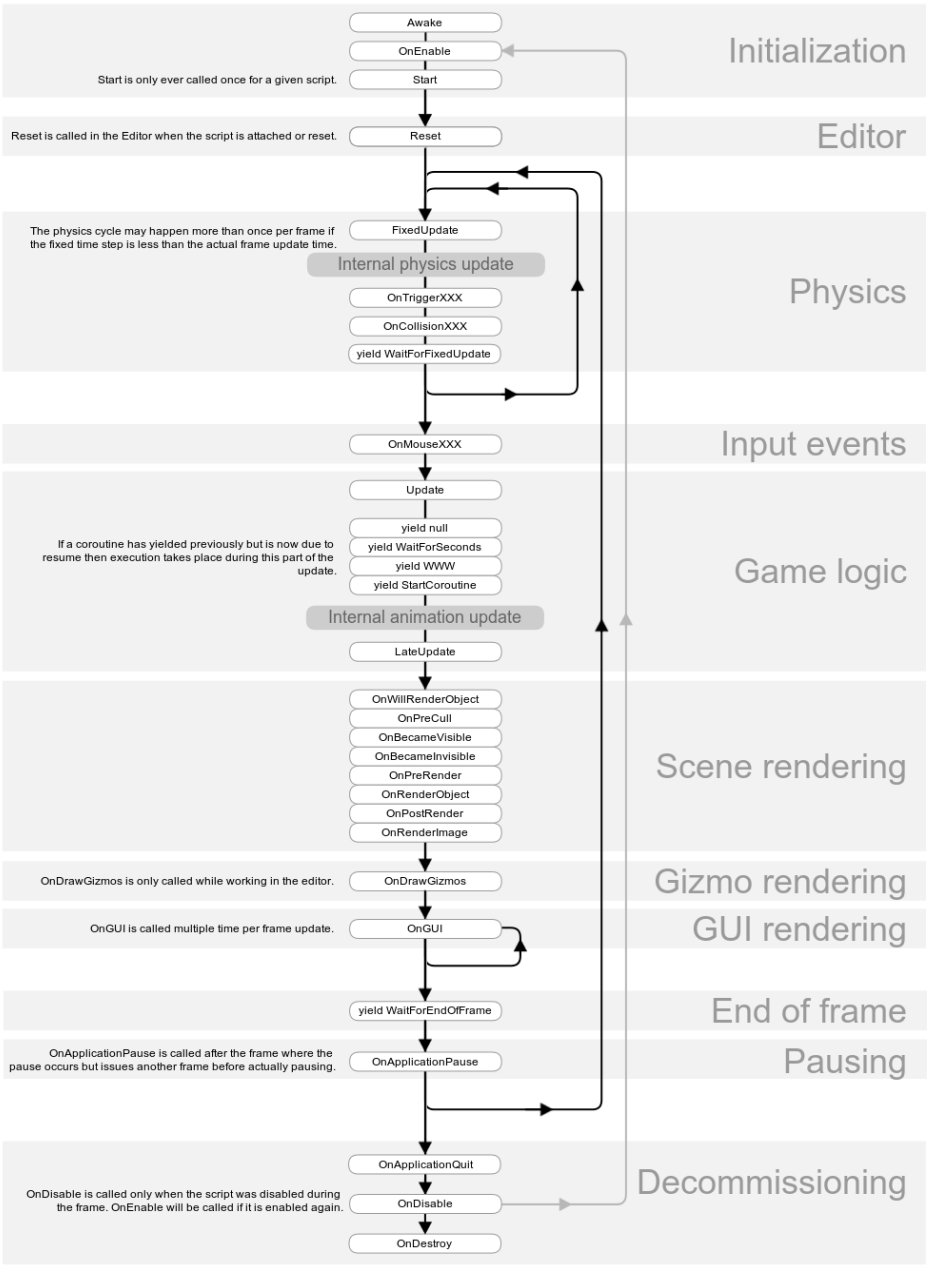

Figura 3.5: In Figura è illustrato l'ordine di esecuzione delle funzioni evento durante il ciclo di vita di uno script Unity.

3.2.3 Controllore PID

Il controllore "Proporzionale, Integrale, Derivativo" (PID) è il sistema di controllo a retroazione negativa più comunemente usato nell'ambito industriale. Come si evince in Figura 3.6, lo scopo del PID è di controllore una variabile in uscita da un processo (output), affinché raggiunga (o perlomeno rientri in un intorno) un certo valore desiderato (riferimento, set-point). Per avvicinarsi al valore di riferimento, il sistema di controllo agisce sugli input da inviare al processo. Per definire questi valori, il PID, innanzitutto, va a calcolarsi la differenza tra l'output e il valore di riferimento. Questa differenza viene chiamata errore, ossia quanto la variabile del processo

da controllare si discosta dal valore che dovrebbe assumere. Calcolato l'errore, l'input da inviare al processo viene definito come la somma di tre azioni di controllo, una proporzionale, una integrale e una derivativa.

L'azione proporzionale ha lo scopo di ridurre l'errore nel tempo. E' calcolata moltiplicando l'errore $e(t)$ con un'opportuna costante: $u_p = K_p \cdot e(t)$. La sola applicazione dell'azione proporzionale basterebbe nel caso in cui il processo fosse asintoticamente stabile. Purtroppo, questo tipo di azione ha delle debolezze: tende ad oscillare intorno al valore di riferimento, prima di raggiungerlo, genera un input nullo quando l'errore è nullo ed, infine, è molto sensibile ai disturbi esterni.

L'azione integrale ha lo scopo di portare il processo esattamente al valore di riferimento, in modo veloce senza oscillazioni. Ciò avviene, poiché l'azione integrale memorizza i valori passati dell'errore, moltiplicando l'integrale dell'errore per un costante opportuna: $u_i = K_i \cdot \int e(t)\,\mathrm{d}t$. Rispetto all'azione proporzionale, quella integrale non è nulla per errori nulli ed è resistente ai segnali di disturbo. D'altra parte, un elevato valore della costate K_i può comportare la saturazione del segnale di input, andando così a stressare il processo.

L'azione derivativa serve per migliorare le prestazioni del sistema, moltiplicando un'opportuna costante con la derivata dell'errore : $u_d = K_d \cdot \frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}$. Questo tipo di azione valuta la variazione dell'errore nel tempo, prevedendo il suo andamento, in modo da compensare le oscillazioni e le saturazioni, dovute alle azioni proporzionali e integrali. Questo tipo di azione però non è sempre usata poiché troppo sensibile alle brusche variazioni.

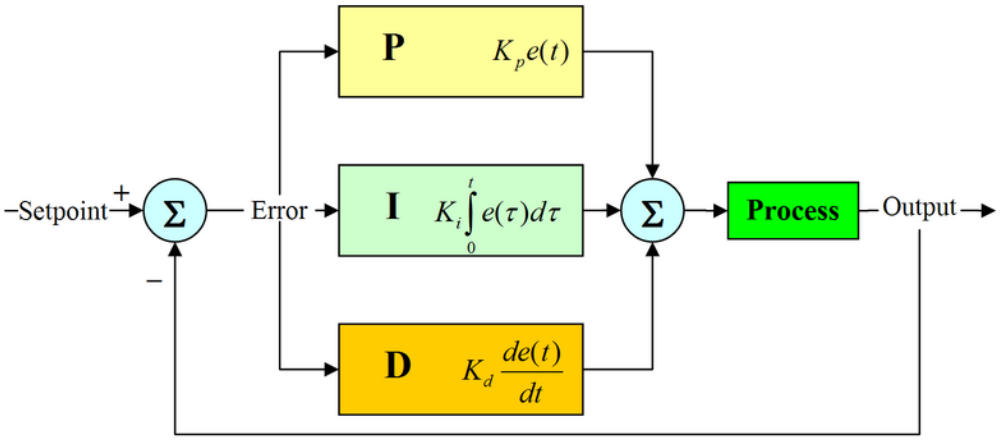

Figura 3.6: Schema controllore PID.

Per il lavoro di tesi sono stati implementati due unity script, in c#, per controllare la posizione e l'orientamento del robot. Le variabili di processo vengono rilevate dal dispositivo di tracking, per calcolare l'errore, rispetto ai valori di posa di riferimento. Di seguito, l'azione di controllo calcolata viene inviata tramite la libreria java al robot. Il tutto si ripete finché l'errore non scende al di sotto di una soglia accettabile stabilita.

Capitolo 4

Progettazione

Nel seguente capitolo si discuterà delle fasi di progettazione dell'applicazione, dall'analisi dei dispositivi, alle proposte di gioco, concludendo con l'architettura e la realizzazione del sistema.

4.1 Specifica dei requisiti

4.1.1 Introduzione

Il punto di partenza del lavoro di tesi è stato quello di sviluppare, dunque, un gioco robotico, ovvero di prendere in considerazione un robot, definendo un'applicazione, un contesto di gioco in cui inserirlo. Per realizzare questa idea sono state seguite in parte le metodologie e le linee guida PIRG (paragrafo 2.3.2), nello specifico è stata posta l'attenzione sul principio del R^3. In sintesi, il concetto essenziale era quello di riprendere un robot commerciale, a basso costo, e riusarlo in un contesto diverso, per dagli un fine, uno scopo nuovo. Un secondo aspetto della tesi consisteva nell'applicare sul robot una tecnologia di tracking, sia per valutarne gli aspetti qualitativi e sia per poter definire un sistema di controllo del robot, dal momento che quest'ultimo non era provvisto di un dispositivo di localizzazione integrato. Associando, dunque, questi dispositivi è stato realizzato un nuovo sistema, tracciabile e controllabile, il quale è stato in seguito valutato all'interno di una serie di contesti di gioco, per comprenderne le potenzialità e l'ambito applicativo, a cui meglio avrebbe potuto adattarsi ed introdurvi maggiori benefici.

4.1.2 Considerazioni empiriche sul robot

Come già è stato accennato nel capitolo sulle tecnologie (paragrafo 3.2.3), la scelta del robot è ricaduta sul Jumping Sumo, per motivi sia di progettazione (PIRG), sia tenici. Infatti, il Jumping Sumo in configurazione ruote aperte (185x150x110 mm) garantisce una maggiore stabilità e la possibilità di agganciare e sostenere i dispositivi adoperati, ovvero il Vive Tracker e la cassa bluetooth. Il Vive Tracker è stato agganciato grazie all'utilizzo di appositi cinturini sulla parte superiore del robot. Questa non è una configurazione standard e usuale tra i due dispositivi, tanto è vero che il Vive Tracker non corrisponde esattamente con il baricentro del Jumping Sumo ed, inoltre, non essendo legato in una modalità conforme, è stato soggetto sicuramente a piccole oscillazioni. Tutto ciò ha certamente comportato degli errori nel calcolo della posizione del robot, nel momento in cui è stato applicato un controllo di tipo PID. Per ovviare a questa tipologia di problemi, si è considerato di far cadere, l'eventuale errore di posizione, all'interno di un determinato intervallo di tolleranza, il quale è stato calcolato in base alla dimensioni assunte dal robot. Nello specifico, dal momento che il Jumping Sumo in configurazione ruote aperte ha una dimensione spaziale massima che va dai 15 ai 20cm, è stato preso tale intervallo come la soglia sotto la quale far rientrare l'eventuale errore di posizione.

Successivamente sono state fatte delle considerazioni empiriche sull'area di gioco disponibile e sui movimenti del robot. Per quanto riguarda lo spazio di lavoro sono state valutate tutte le posizioni in cui il Vive Tracker fosse rilevato dalle rispettive base station. E' stata calcolata, dunque, un'area di gioco di circa $30m^2$ (5m*6m), la quale è risultata certamente sufficiente rispetto al tipo di ambiente di gioco ipotizzato, che prevedeva un uso del robot all'interno di spazi chiusi, quali abitazioni, studi, laboratori. In seguito, grazie alla modalità "RoadMap" dell'applicazione FreeFlight3, sono stati definiti una serie di percorsi da far eseguire al Jumping Sumo, per valutarne i movimenti e la stabilità. Il robot è stato accessoriato con il Vive Tracker per acquisire un numero di campioni sufficienti (24-30 campioni al secondo) da adoperare per successive analisi. Prima di illustrare i vari risultati, bisogna comunque ricordare che questi test non hanno considerato tutte le linee guida di una buona misurazione, quali numero di campioni, stima dell'errore, ecc. Anche lo stato del robot, quali usura ruote, qualità batteria (questa può incidere sulla velocità), peso degli accessori, andrebbero considerati per dei buoni test. Inoltre, non bisogna dimenticare che anche il Vive Tracker è affetto da un errore di misurazione, dovuto da diversi fattori, quali la configurazione non idonea sul robot, la possibile perdita del tracciamento da parte delle base station, l'altezza e l'eventuale inclinazione del dispositivo, come descritto in [50] [49].

I test sono stati condotti andando a modificare tre fattori, ovvero la velocità del robot, la lunghezza e il tipo di percorso. Nei primi test è stato impostato un tracciato quadrato di lato 1m, con una velocità del robot di 2 m/s e un raggio di curvatura pari a zero, in modo che il robot ruotasse di 90° su sè stesso. Dalla Figura 4.1, si evince come alla massima velocità, il Jumping Sumo abbia "sbandato", sopratutto nei cambi di direzione, accumulando un errore, dai 20 ai 50 cm, che l'ha portato a percorrere i lati a una lunghezza inferiore al metro. D'altra parte, considerando lati più lunghi (2 m), per offrire un maggiore spazio al robot, è stato osservato che questo ha perso più centimetri lungo il tragitto, dai 60 agli 80 cm (Figura 4.2).

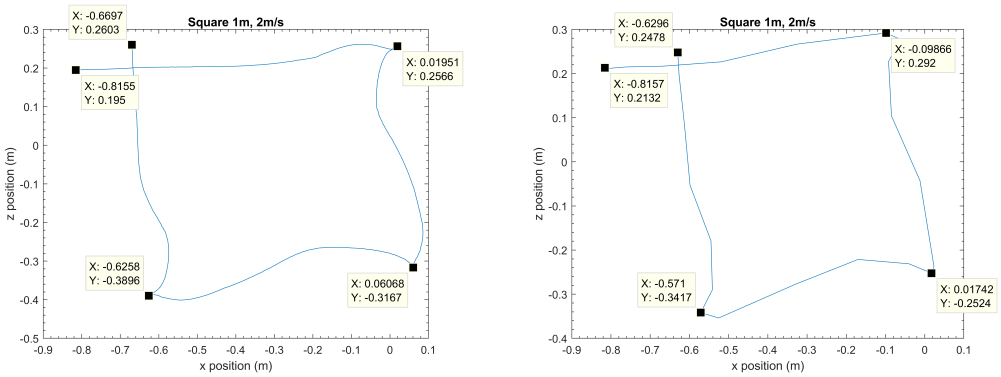

Figura 4.1: Test movimenti Jumping Sumo su un tragitto quadrato di lato 1m, alla velocità di 2 m/s.

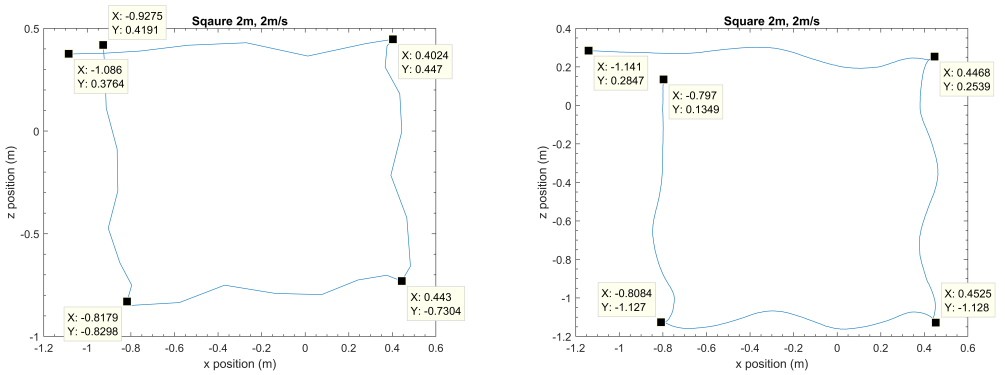

Figura 4.2: Test movimenti Jumping Sumo su un tragitto quadrato di lato 2 m, alla velocità di 2 m/s.

In Figura 4.3 è riportato un test su un percorso quadrato di lato 1 m, alla velocità di 1 m/s: si osserva come il Jumping Sumo sia riuscito a tracciare un percorso più lineare e preciso, anche nei cambi di direzione. Sebbene abbia percorso i lati con un errore molto più piccolo, sotto i 10 cm, il robot non ritorna mai nel punto esatto di partenza. Un raffronto simile, è stato evidenziato nei test su un percorso rettangolare, di lati, 1m e 2m (Figura 4.4), e su uno ellissoidale, con raggio di curvatura di 50cm (Figura 4.5), dove, a velocità di 2 m/s, il robot ha perso di precisione nel disegnare la curva (errore intorno ai 30cm), mentre, ad una velocità di 1 m/s, ha mantenuto una buona stabilità e precisione nel percorrere i tratti (errore sotto i 10cm). Successivamente il robot è stato pilotato lungo un tragitto lineare di 4m e 6m, a una velocità di 2 m/s, per valutare lo sbandamento laterale. Dalle immagini in Figura 4.6, è stato riscontrato che questo intervallo andava dai 6 agli 11cm. Inoltre, è stato osservato che il robot necessitava di un certo spazio per raggiungere la sua velocità massima e mantenerla costante.

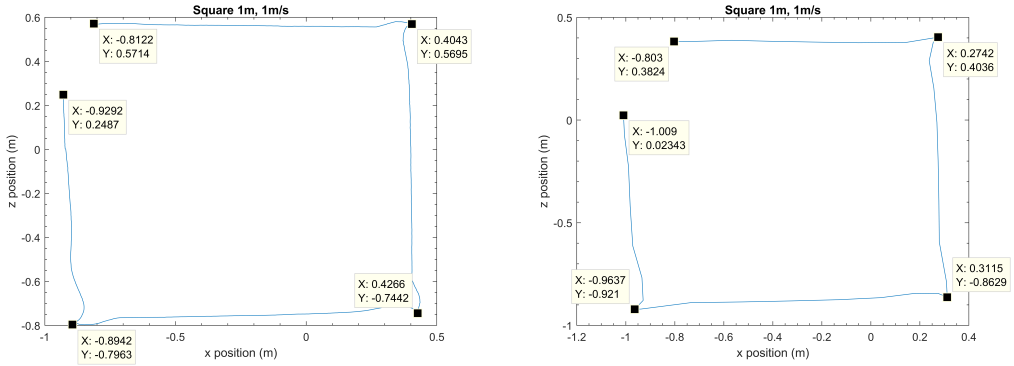

Figura 4.3: Test movimenti Jumping Sumo su un tragitto quadrato di lato 1m, alla velocità di 1 m/s.

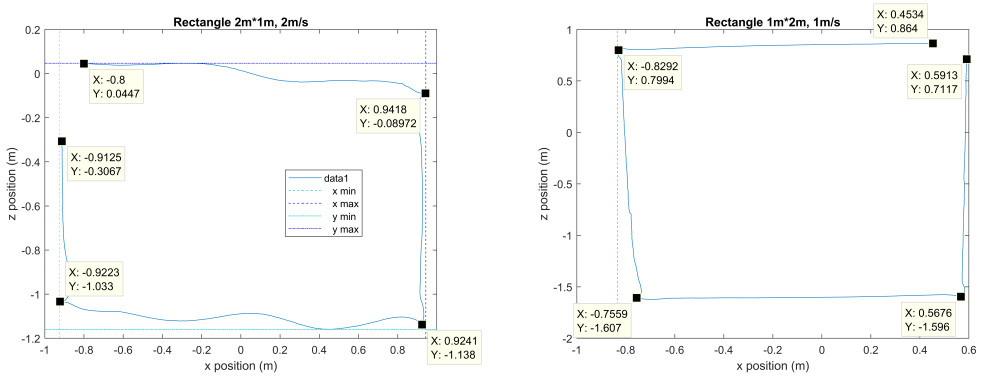

Figura 4.4: Test movimenti Jumping Sumo su un tragitto rettangolare di lati 1 m e 2 m, alla velocità di 2 m/s (sinistra) e 1 m/s (destra).

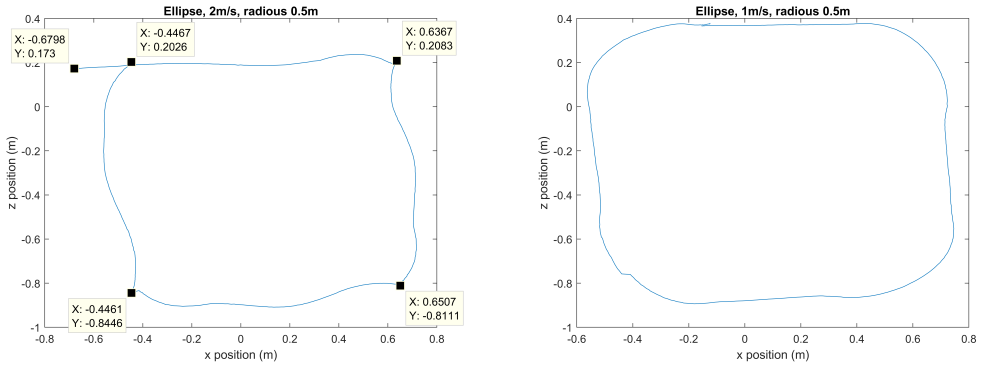

Figura 4.5: Test movimenti Jumping Sumo su un tragitto ellissoidale di raggio 50cm, alla velocità di 2 m/s (sinistra) e 1 m/s (destra).

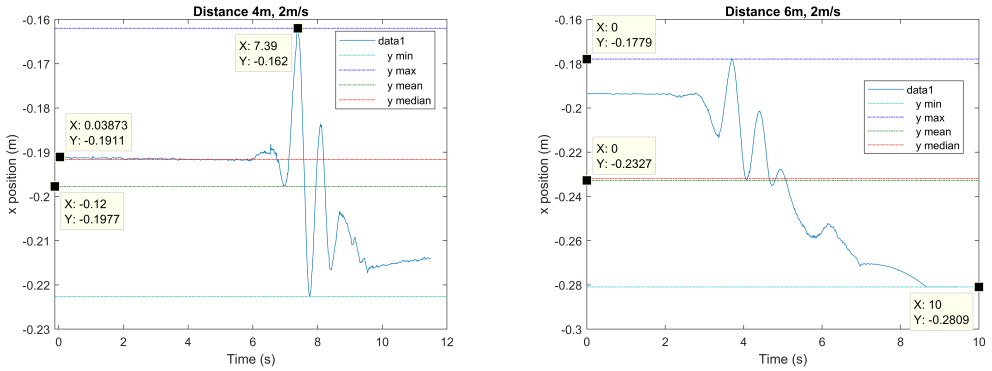

Figura 4.6: Test scostamento laterale Jumping Sumo su un tragitto lineare di 4 m (sinistra) e 6 m (destra), alla velocità di 2 m/s.

In conclusione questi test empirici hanno condotto a fare alcune semplici considerazioni: se avessimo voluto sviluppare un gioco più dinamico, con maggiore libertà di movimento, avremmo avuto bisogno di accettare un errore di posizione maggiore e una stabilità inferiore del robot; in caso contrario, sarebbe stato opportuno ridurre il dinamismo per ottenere una maggiore precisione. Inoltre, in un contesto di gioco con uno spazio limitato sarebbe stato difficile raggiungere e mantenere velocità elevate, senza perdere il controllo del robot. E' stato considerato anche il fatto che sarebbe stato necessario uno spazio di *overshoot* (in aggiunta) per ogni lato dell'area di gioco, in modo tale da evitare il rischio di impatto con muri o quant'altro. In aggiunta, dal momento che, era prevista la presenza di almeno di un giocatore all'interno della scena, un robot troppo dinamico sarebbe potuto essere un rischio per sè stesso e il giocatore.

4.1.3 Controllo del robot

Affinché il Jumping Sumo possa raggiungere una determinata posizione (target), l'azione di controllo è stata suddivisa in due componenti: una si occupa dell'orientamento del robot rispetto al target, l'altra, invece, della distanza da percorrere. A tal proposito è stato realizzato un modulo generico, che fa da controllore PID. Questo componente prende come parametri di input oltre le tre costanti (proporzionale, integrale e derivativa), l'ordine del filtro derivativo e un fattore beta. Quest'ultimo è una costante, che varia da 0 a 1, per andare a pesare la variabile di riferimento, quando si calcola l'azione proporzionale, in modo da ridurre la possibilità che, l'input calcolato in ingresso al sistema, sia superiore a un valore di saturazione. Il filtro derivativo, invece, serve a risolvere alcuni problemi che riguardano il regolatore PID teorico, quali l'amplificazione del segnale e l'introduzioni di possibili oscillazioni da parte dell'azione derivativa, e il problema che non è possibile fornire fisicamente un regolatore PID, dal momento che la sua funzione di trasferimento è non propria [51]. Inoltre, è solito esercitare l'azione derivativa solo sulla

variabile controllata e non sull'errore, poiché, in presenza di un impulso del segnale a gradino, l'uscita avrebbe un andamento impulsivo e questa brusca variazione potrebbe, dunque, saturare l'input e danneggiare il sistema. Lo stesso problema di saturazione dell'attuatore è possibile averlo anche con l'azione integrativa ("wind-up") e per questo motivo è stata adoperata una tecnica, che prevede un termine di compensazione all'ingresso dell'azione integrale. Fintanto che il controllore non satura non succede nulla, ma quando ciò accade si va a sommare un termine (di segno opposto al segnale di errore) all'azione integrale, in modo da attenuarla nel successivo calcolo del valore dell'attuatore.

Il modulo PID prevede una funzione che calcola l'azione di controllo da inviare come input al sistema, in base ai dei parametri che riceve, quali la variabile di riferimento, la variabile di processo, i valori di massima e minima saturazione e la soglia di tolleranza, sotto la quale l'errore è accettabile. Nel caso del controllo della distanza, la variabile di riferimento è il modulo del vettore che va dalla posizione del robot sul piano xz a quella desiderata (target). Come già accennato, non è possibile dare come input agli attuatori del robot un valore di velocità in metri al secondo, ma è necessario inviare un comando numerico che cade nell'intervallo tra 0 e 100 (per farlo avanzare). Quindi, in ogni istante di tempo, vengono inviati al modulo PID i seguenti parametri: la differenza tra la posizione corrente del robot, fornita dalla matrice di trasformazione del Vive Tracker in Unity, e la posizione del target, un valore di saturazione (100), una soglia di tolleranza, che abbiamo già considerato tra i 15 e i 20 cm. Lo stesso processo avviene per il controllo della rotazione, dove, il riferimento è l'angolo minimo che deve percorrere il robot in modo tale che il suo vettore di orientamento punti verso il target, e la variabile di processo è la matrice di rotazione del Vive Tracker (Figura 4.7). Per quanto riguarda la soglia di tolleranza dell'errore angolare, è stato scelto un valore tra i 3 e 5 gradi, avendo constatato empiricamente che, per ottenere rotazioni minime effettive del robot, bisognava fornire un comando pari o superiore ai gradi considerati. Per fare maggiore chiarezza, se inviassimo in input valori di rotazione, più piccoli di 3-5 gradi, il robot tenderebbe a rimanere fermo, senza apportare variazioni sull'orientamento. Questa considerazione ha portato, dunque, a settare tale soglia di tolleranza, dal momento che, se fosse più piccola, il robot si potrebbe ritrovare in un ciclo infinito, in cui cercherebbe di diminuire un eventuale errore molto piccolo, dando in ingresso agli attuatori un input piccolo, che non cambierebbe mai la sua rotazione e il suo orientamento. Lo stesso ragionamento è stato valutato anche per la velocità, dove abbiamo constatato, per la configurazione data al robot, un valore minimo (20-30) per ottenere degli avanzamenti misurabili.

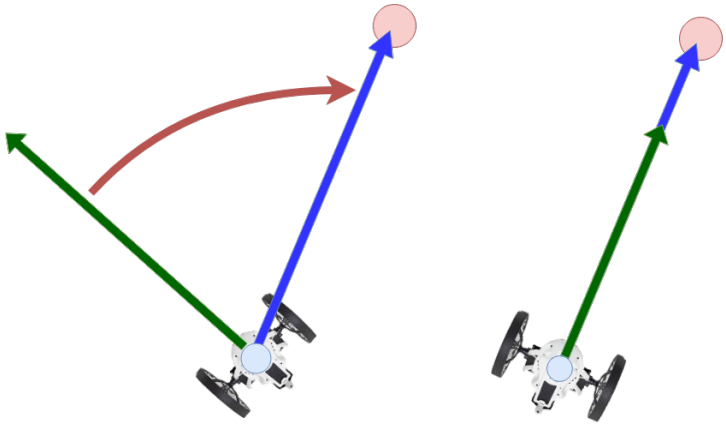

Figura 4.7: Esempio di come lavora il modulo del controllore PID. Per avanzare verso il target (punto rosso), il robot deve compiere due operazioni: la prima (a sinistra) consiste nel compiere una rotazione (vettore rosso), pari all'angolo compreso tra il suo vettore di orientamento (verde) e il vettore distanza (blu); la seconda (a destra) consiste, una volta orientato lungo il vettore distanza, nel percorrere il modulo di tale vettore.

Definiti i due componenti PID, sono stati, in seguito, realizzate due modalità di controllo della posizione. La prima, detta in serie, è descritta in Figura 4.7: il robot esegue prima un controllo dell'orientamento e successivamente regola la sua velocità per raggiungere la distanza desiderata. Nella fase in cui va a regolare la sua rotazione, è stato inserito un contatore numerico,

che quando scatta, ferma il controllo della rotazione e fa partire quello successivo, per evitare i cicli infiniti, citati sopra, in cui il robot cerca di scendere sotto una soglia di tolleranza molto piccola.Per il controllo della distanza, invece, è stato aggiunto un sistema di previsione del punto di arrivo, dal momento che piccoli errori nell'orientamento potrebbero non far coincidere la posizione finale del robot con il target. Dunque, durante la fase di controllo, si traccia un vettore dalla posizione corrente del robot, lungo il suo vettore di orientamento, di modulo pari alla distanza ancora da percorrere, e si calcola se arriverà in un intorno accettabile della posizione target. Nel caso in cui il la posizione prevista non ricade in un intorno del target, il robot ferma il controllo della distanza e regola di nuovo l'orientamento. Da come si può evincere, questo tipo di controllo potrebbe essere molto preciso, ma lento in particolari situazioni. La seconda modalità di controllo, invece, è detta in parallelo, poiché nello stesso istante vengono eseguiti sia il controllo della rotazione che quello della distanza.E' stato constatato che questa modalità offrirebbe al robot un maggiore dinamismo e velocità, a discapito, però, di una minore precisione.

4.1.4 Idee di gioco

Definita la configurazione del robot e i tipi controllo, successivamente sono stati ideati una serie di giochi, sia ludici che in ambito serious game, per valutare in quale contesto sarebbe stato più consono e adatto inserire il sistema realizzato, robot più Vive Tracker.

Gioco 1
Questo gioco si svolge all'interno di un'arena. Ogni giocatore, camminando, lascia una scia luminosa dietro di sé (come nello "Snake", Figura 4.8). Lo scopo del gioco è quello di circondare l'avversario, utilizzando la propria scia, disegnando nel terreno delle figure chiuse. Il gioco è pensato in modalità 1 vs 1 (giocatore contro robot), ma si può espandere anche in un 1 vs 2, dove il giocatore affronta due robot o gioca insieme ad uno di questi contro un nemico virtuale. Ciascuna partita può avvenire in tempo reale o a turni. Le scie lasciate dovrebbero scomparire dopo un certo numero di secondi e non essere permanenti, per dare maggiore difficoltà al gioco. La partita potrebbe prevedere vite o punti: ogni "chiusura" comporterebbe quindi la perdita di vita o un punteggio (fisso, calcolato in base al tipo di chiusura (forma geometrica), al tempo e alla dimensione dell'area disegnata). In aggiunta, potrebbero esserci diversi livelli di difficoltà, "power-up" da raccogliere (esempio, per rallentare il nemico) o oggetti pericolosi. Inoltre, per aumentare l'interesse del giocatore, si potrebbe obbligare quest'ultimo a disegnare una specifica Figura poligonale per circondare l'avversario (esempio, in base ai suoni o al colore del robot bisogna capire che Figura andare a disegnare).

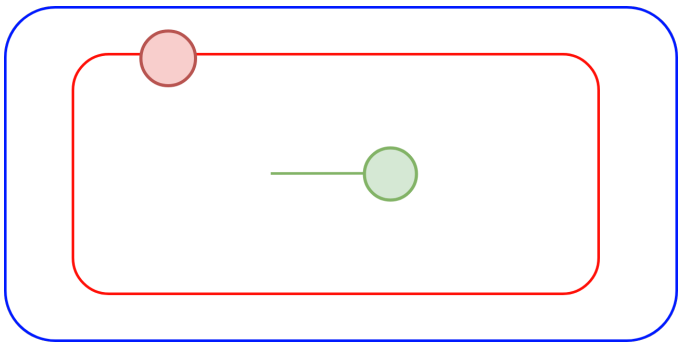

Figura 4.8: Esempio svolgimento del gioco 1. Il giocatore rosso circonda il verde, creando intorno a lui un rettangolo, guadagnando così un certo punteggio o levandogli una vita.

Gioco 2
Giocatore e robot sono compagni di squadra. Lo scopo del robot è quello di eseguire al meglio un compito (esempio, collezionare il maggior numero di monetine nell'arena), mentre, il giocatore ha il dovere di proteggere il "compagno" da eventuali attacchi esterni. I due, dunque, si

troverebbero ad affrontare nemici virtuali, i quali potrebbero essere o piccoli mostri che si avvicinano al proprio "compagno" o anche proiettili che partono da diversi punti dell'arena (Figura 4.9). Il giocatore, per proteggere il robot, deve eseguire un'azione che può consistere o nel fare da scudo/barriera (porsi davanti al compagno) o eseguire azioni particolari (esempio, raccogliere oggetti sul campo di gioco per difendere il robot o eliminare i nemici).

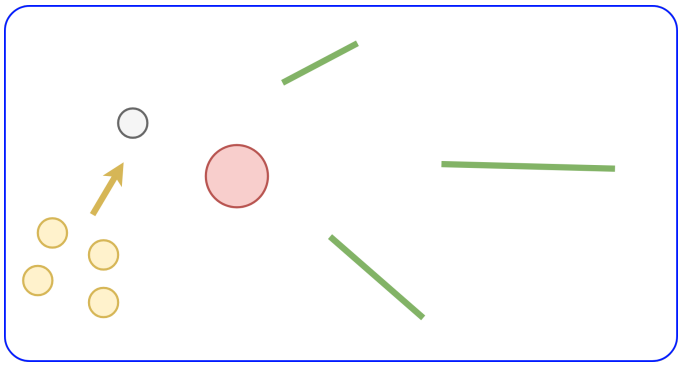

Figura 4.9: Esempio svolgimento del gioco 2. Il giocatore (rosso) difende il robot (nero) da due colpi laser (verdi), ma intanto il compagno viene attaccato da un'orda di mostri nemici (gialli).

Gioco 3
Questo gioco vorrebbe cercare di unire le abilità di logica e velocità, prevedendo uno scontro tra un giocatore e un robot. Nell'arena sono poste una serie di carte virtuali o fisiche, ognuna delle quali ha caratteristiche diverse (esempio, carta per attacco, difesa, speciale, ecc.). A ogni turno vengono generate delle carte coperte nel terreno di gioco: quando queste vengono scoperte ciascun avversario ha un lasso di tempo per scegliere la sua carta in base alla tattica che vuole applicare, alla distanza da quest'ultima, al tipo di carte in gioco ed, eventualmente, alla scelta già fatta dall'avversario. Una volta selezionata la carta verrà calcolata l'azione dei corrispettivi giocatori (esempio, uno esegue un attacco, l'altro si difende con una carta "scudo"). L'idea è di posizionare tanti tipi di carte, sia bonus che malus, e generarle anche in base al modo in cui il match sta andando (esempio, il giocatore ha poca vita si generano carte cura). Lo scontro a turni tra giocatore e robot servirebbe a dare a quest'ultimo una maggiore rilevanza (l'utente potrebbe vedere nel robot un agente da sconfiggere). Ciò nonostante, si potrebbe anche pensare ad un utente aiutato dal robot contro un nemico virtuale. Le carte, inoltre, condivise nell'arena, potrebbero essere o sparse o messe in linea al centro del campo da gioco (Figura 4.10). Vince chi resta in vita o raggiunge un certo punteggio. Alla fine di ogni selezione carta si potrebbero eseguire animazioni, per attirare e divertire maggiormente il giocatore, e suoni, per dettare il tempo di gioco e aggiornare sullo stato della partita. Nel gioco ci sarebbe la possibilità di inserire più livelli di difficoltà (esempio, robot più intelligente, poche carte sul terreno, precedenza al robot nella selezione della carta). Il robot potrebbe emettere suoni o colori in base al suo status o ai suoi HP.

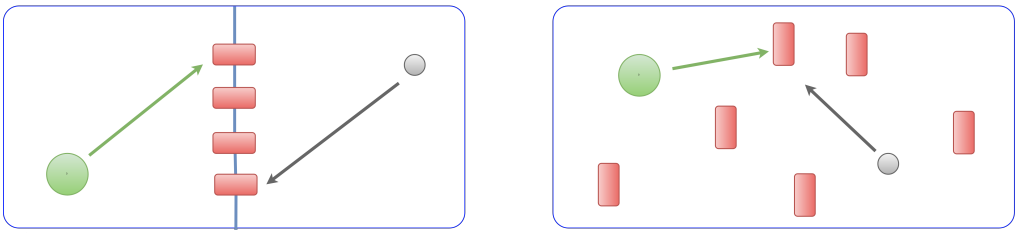

Figura 4.10: Esempio svolgimento del gioco 3. A sinistra modalità carte condivise sulla linea al centro: ogni giocatore ha la sua zona di campo e non può invadere quella nemica. Eventuali bonus, malus cadrebbero solo per uno specifico giocatore. Si potrebbe pensare, dunque, a rilasciare oggetti in due modalità: o casuali o "ragionati", in base allo status del corrispettivo giocatore e a quello della partita. Per questa modalità il giocatore, ad ogni turno, dovrebbe comunque ritornare ad una linea di partenza. A destra, modalità carte condivise per tutta l'arena: qui entra in gioco anche il fattore distanza/tempo e condivisione bonus, malus (casuali o non). Il gioco in questa versione sarebbe più dinamico, avendo a disposizione tutta l'area.

Gioco 4

Questo è un gioco serioso, che vorrebbe aiutare a migliorare le capacità uditive spaziali per i più piccoli. Al centro del campo da gioco si posiziona il bambino bendato, mentre, il robot gira nella scena intorno a quest'ultimo. Lo scopo è quello di "percepire" il robot, attraverso un particolare suono, che emette ad intervalli temporali, e, dunque, direzionare lo sguardo verso di esso (Figura 4.11). Il gioco potrebbe prevedere diverse difficoltà: per esempio emissione di più suoni da diversi punti, sovrapposti al suono da percepire, o svariati suoni emessi dallo stesso robot. L'utente dovrà, quindi, o direzionare lo sguardo verso il robot giusto o verso l'unico robot, solo quando questo emette il suono desiderato. All'inizio del gioco sarebbe opportuno che il robot emettesse una o più volte il suono da percepire per facilitarne la memorizzazione. Ogni volta che il bambino indovina la direzione dovrebbe riprodurre una melodia o qualcosa che comunque lo ricompensi.

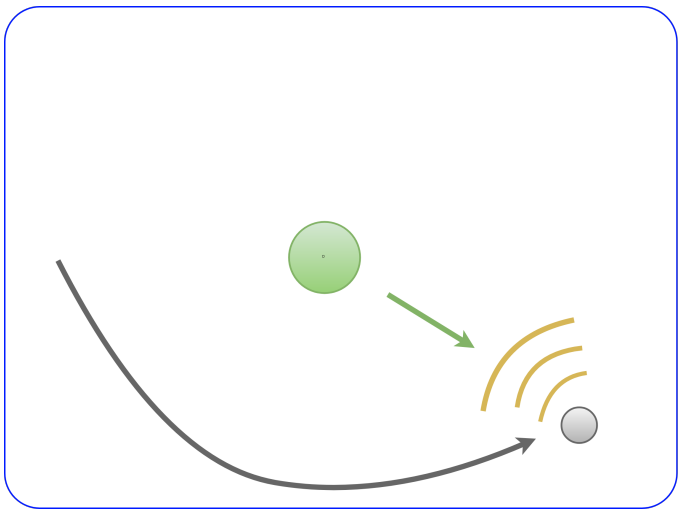

Figura 4.11: Esempio svolgimento del gioco 4: il robot (nero) gira intorno al bambino (verde) ed emette un suono (giallo). Il bambino percepisce il suono e rivolge lo sguardo verso il robot ed eventualmente si dirige verso di questo.

Gioco 5

L'idea è di realizzare il gioco "un, due, tre, stella!" per i bambini. Uno o più giocatori si posizionano da un lato dell'arena, mentre, dall'altro lato viene messo un robot che fa da "guardia". Lo scopo è quello di raggiungere il robot dall'altro lato (superare una linea nelle vicinanze), senza farsi cogliere in movimento. Il robot emetterebbe suoni o colori per indicare ai bambini

quando devono fermarsi. Sarebbe possibile anche inserire la rotazione di quest'ultimo per dargli un senso di maggiore autorità. Quando il robot si gira per osservare i movimenti, ogni giocatore ha un intervallo di tempo per fermarsi: se viene rilevato, dovrà o stare fermo un turno o indietreggiare (il gioco potrebbe non prevede punti o vite per non demoralizzare i bambini). Per aggiungere gradi di difficoltà, si potrebbero inserire percorsi o ostacoli virtuali/reali. L'elemento significativo del gioco è la possibilità di condividere un'esperienza ludica in compagnia.

Gioco 6
Questo serious game, pensato per i bambini, vorrebbe stimolare la loro attenzione e reattività. Nell'arena ad ogni turno compariranno figure geometriche di diversa dimensione, forma e colore. Lo scopo del robot è quello di dare delle direttive ai bambini, in base, ai colori, suoni o ai movimenti che esegue. Queste direttive possono essere varie:

- posizionarsi sulla figura geometrica richiesta;
- posizionarsi sul colore richiesto;
- una combinazione delle prime due (esempio, triangolo rosso);
- toccare due figure identiche (forma e o colore o dimensione o entrambe);
- toccare le figure in ordine crescente o decrescente di dimensione;
- combinazioni dei vari punti.

Un altro aspetto del gioco potrebbero essere le diverse modalità di partita: singola, a squadre, tutti contro tutti. Il robot non sarebbe però un agente attivo, dinamico, ma piuttosto avrebbe un ruolo di tutor, insegnante: in caso di risposte esatte, emetterebbe un suono, un colore o eseguirebbe un movimento. In base al tipo di direttiva, le figure possono sparire e poi ricomparire o essere capovolte (per i giochi di memoria).

Gioco 7
L'idea prende spunto dal gioco arcade "Frogger". Lo scopo del giocatore sarebbe, quindi, di attraversare da un lato all'altro il campo da gioco, tramite delle piattaforme mobili, facendo attenzione ad eventuali mostri che potrebbero colpirlo. L'utente potrebbe giocare sia contro che insieme al robot: in questo caso lo scopo del giocatore sarebbe quello di "accompagnare" il robot dall'altro lato dell'arena. In sostanza, il robot seguirebbe a una certa distanza il giocatore, il quale dovrebbe fare attenzione a non farlo cadere dalle piattaforme o darlo in pasto a mostri. Le piattaforme potrebbero essere elementi reali o virtuali della scena, le quali si dovrebbero muovere dopo un certo intervallo, per permettere comunque i movimenti del giocatore e del robot. Bisognerebbe spostarsi da una piattaforma prima che questa attraversi tutta l'arena: nel caso non si riuscisse, si applicherebbe una penalità. Non tutte le piattaforme sarebbero "amiche", altre potrebbero crollare (esempio, in base al variare del colore), altre nascondere nemici o altro. Nella modalità di 1 vs 1 vincerebbe il concorrente arrivato primo dall'altro lato, invece, in caso di gioco di squadra si potrebbero assegnare dei punti in base ai tempi di percorrenza. Ogni penalità comporterebbe una perdita di punteggio o l'obbligo di iniziare il gioco da capo.

Gioco 8
Gioco di tipo "sopravvivenza" e resistenza. In sintesi, il giocatore è inseguito all'interno dell'arena da un robot, il quale ha lo scopo di catturarlo. Più tempo il giocatore riesce a resistere (a non farsi prendere) maggiore è il punteggio che ottiene. Per aumentare le possibilità del giocatore di sfuggire alla cattura, vengono rilasciate a precisi istanti di tempo "casse" contenenti aiuti, "power-up" (esempio, rallentamento del robot, invisibilità, bombe, immunità temporale). Per rendere il gioco più coinvolgente, l'utente potrebbe raccogliere delle monetine all'interno del campo per aumentare il suo punteggio, aggiungere diversi livelli di difficoltà, inserire ostacoli, percorsi, diminuire con il tempo lo spazio dell'arena per mettere in difficoltà il giocatore.

Gioco 9
L'arena è una scacchiera, piena di tasselli di diversi colori. Lo scopo del giocatore è di colorare tutti i tasselli di un solo colore, fermandosi sopra di essi. Questo gioco prende spunto dall'arcade "Qbert": la modalità di gioco sarebbe un 1 vs 1, dove l'avversario è un robot. Per ogni tassello toccato, il giocatore potrebbe accumulare dei punti. Nel momento in cui il robot si fermasse sopra i tasselli del giocatore, ne cambierebbe il colore, togliendo punti. Per colorare ogni tassello bisognerebbe fermarcisi sopra per un certo numero di secondi. Un'altra modalità, potrebbe prevedere che anche il robot dovesse colorare i tasselli di un suo colore, in modo da rendere il gioco più competitivo. In tale modalità, sia il giocatore, sia il robot, potrebbero convertire i tasselli avversari nel proprio colore. Per quanto riguarda i tempi per colorare i tasselli, si potrebbero considerare due valori differenti: uno più breve nel caso si colori un tassello neutro, che non appartiene a nessuno dei due avversari, e uno più lungo, per convertire un tassello nemico. Lo stesso ragionamento potrebbe essere fatto per quanto riguarda i punteggi. Allo scadere del tempo vincerebbe chi avesse guadagnato il maggiore punteggio.

4.1.5 Valutazione delle idee di gioco

Da una prima analisi, i giochi ideati si basano due caratteristiche principali: il dinamismo e l'intrattenimento. Questo ultimo concetto riprende il principio PIRG, del "Do it for fun" (paragrafo 2.3.2), ovvero intrattenere, stimolare e divertire il giocatore, mentre, il dinamismo è stato inserito per coinvolgere i giocatori in un attività non troppo statica, ma più vivace. Inoltre, la componente dinamica dei giochi è una conseguenza logica della presenza, nel lavoro di tesi, di un dispositivo di tracciamento: infatti, sarebbe stato controproducente sviluppare un gioco totalmente statico, fermo, dove il tracking sarebbe risultato meno rilevante. Nella valutazione dei giochi è stato considerato, anche, che la presenza del robot non cadesse in secondo piano, ma fosse risaltata grazie ad un ruolo ben definito, che lo caratterizzasse come un'agente razionale ("Robot as a rational agent").

Seguono, dunque, una serie di osservazioni sui vari giochi proposti, senza soffermarsi sulle singole attività, ma piuttosto, sulle caratteristiche che le accomunano. Ponendo l'attenzione in primis sulla componente di dinamismo, è stato constatato che oltre a cercare di alleviare il problema sedentario dei giocatori, sopratutto di piccola età, questa aveva come obiettivo quello di rendere il Jumping Sumo non un semplice robot, ma un vero personaggio, al centro della scena, con delle caratteristiche ben definite. Tanto è vero che sono state presentate idee, in cui il robot fosse un compagno di squadra, un avversario, un'autorità. Nonostante ciò, la presenza del robot non è stata valutata talmente fondamentale da non poter essere sostituita da una figura diversa, per esempio virtuale. Un motivo potrebbero anche essere le ridotte dimensioni del robot, le quali non attirerebbero la sufficiente attenzione del giocatore, ovvero potremmo definire il Jumping Sumo poco "carismatico" rispetto ad altri robot o droni in commercio. Per quanto riguarda, invece, i movimenti del robot, è stato osservato che, nonostante questo abbia le potenzialità di raggiungere una buona velocità, non è stato valutato capace di possedere grande agilità e precisione, sopratutto, nei cambi repentini di direzione. In aggiunta, paragonando la velocità e il volume d'azione del giocatore con quello del robot, sarebbe stato doveroso aggiungere limitazioni o escamotage (esempio, gioco a turni) per dare al gioco il giusto bilanciamento. In alcune attività sono state definite, anche, azioni del personaggio troppo ferme e statiche, le quali avrebbero potuto rendere un uso del tracking non particolarmente significativo. Infine, è bene evidenziare il problema che non sempre sarebbe possibile avere uno spazio di gioco ampio, ma il più delle volte bisogna far fronte ad aeree di gioco limitate, dal momento che il contesto in cui va ad introdursi questa tipologia di gioco è quello degli spazio comuni, quali ad esempio il salotto di un'abitazione. Dunque, andando a considerare uno spazio maggiormente limitato, i giochi con troppa complessità, variabili, oggetti sulla scena sarebbero stati un grosso problema, sia per i movimenti e sia per la sicurezza del giocatore e del robot ("Play it safely"). Questo ragionamento includeva anche tutte quelle attività di gruppo, basate sulla presenza contemporanea di più giocatori.

In sintesi, sebbene il concetto di dinamismo aveva come obiettivo quello di aggiungere maggiore intrattenimento e coinvolgimento del giocatore, dando al robot una forte caratterizzazione, è stata valutata ostica la realizzazione delle idee di gioco, le quali introducessero un interazione

dinamica tra i giocatori ed il robot. D'altra parte, sono state scartate anche quelle proposte, in cui si prevedesse troppa staticità, o che introducessero un'elevata complessità, insieme ad un elevato numero di variabili e oggetti all'interno della scena. Quest'analisi ha spinto a prendere in considerazione quelle idee di gioco, dove il robot fosse in movimento, dando maggiore rilevanza al tracking, ma con un andamento del robot più moderato ed un'interazione uomo-robot meno dinamica, in modo dà rendere possibile lo svolgimento di un'attività all'interno di un eventuale spazio limitato.

D'altra parte, facendo un'analisi sulla tipologia dei giochi, è stato osservato come una soluzione di gioco robotico in ambito serious game avrebbe potuto conformarsi meglio ai vincoli presenti, poiché da un lato i serious game definiti non richiedevano necessariamente un forte dinamismo tra il robot e il giocatore, e dall'altro queste tipologie di gioco davano la possibilità di offrire al robot un ruolo maggiormente rilevante, avendo uno scopo al di là del puro intrattenimento. Per questo motivo, è stato preso in considerazione il serious game come training delle funzionalità uditive del giocatore (gioco 4), dal momento che in ambito audiologico, una soluzione di gioco robotico avrebbe potuto stimolare e motivare soggetti, con particolari patologie, ad intraprendere un percorso terapeutico, oltre che ad offrire un sistema, una strumentazione differente, a basso costo, ma sopratutto sicura, tracciabile ed oggettiva.

In conclusione, da queste considerazioni sono state gettate le basi per una soluzione di gioco robotico di tipo exergame, ovvero un training attraverso l'utilizzo di un robot. Da questo punto della tesi, è stato necessario affidarsi alla collaborazione con il Dipartimento di Scienze Chirurgiche dell'Università degli Studi di Torino, per avere un'analisi più tecnica e scientifica nell'ambito della letteratura audiologica, per comprendere in quale ambito la soluzione avrebbe potuto apportare maggiori benefici. Da questa collaborazione è stato osservato come in letteratura fosse ancora oggi presente una lacuna di strumenti non soggettivi per fare analisi, allenamento e riabilitazione di specifiche funzionalità audiologiche, quali l'apparato vestibolare e il sistema della navigation. Da questa valutazione, è stato in seguito realizzato un nuovo protocollo di analisi e allenamento, che facesse uso del sistema, robot più Vive Tracker. Tuttavia, prima di introdurre le fasi di sviluppo del gioco, è bene fare excursus, nel paragrafo successivo, sul sistema uditivo, l'apparato vestibolare e la navigation, per meglio comprendere gli aspetti cognitivi e fisiologici dell'udito umano e le metodologie presenti in letteratura per fare rieducazione, analisi e riabilitazione.

4.1.6 Sistema uditivo, apparato vestibolare e navigation.

In primo luogo, è doveroso specificare che il sistema uditivo e l'apparato vestibolare non sono strettamente correlati, ma hanno funzionalità diverse. Per quanto riguarda la navigation, questa non fa affidamento solo sul sistema vestibolare, ma sopratutto su altre capacità come quelle visive e di propriocezione. Per poter trattare del sistema uditivo, nello specifico della localizzazione sonora e la percezione, e dell'apparato vestibolare, si ritiene utile fare un introduzione sul suono, come tipo di segnale, e sulla fisiologia delle orecchie.

Segnale audio
Nel libro "Audio e multimedia" [52], il suono è descritto come un onda meccanica che trasporta energia lontano dalla sorgente sonora. Semplificando, il suono è un segnale, prodotto dalla vibrazione di un oggetto (sorgente sonora) che si propaga attraverso un mezzo (aria). La propagazione dell'onda sonora si distribuisce in tutto lo spazio circostante, in tutte le direzioni, facendo vibrare di conseguenza ogni oggetto che incontra sul proprio percorso. I tipi di onde si suddividono in due categorie: onde longitudinali, se l'asse lungo la quale avviene la vibrazione dell'oggetto è lo stesso della direzione di propagazione, e onde traversali se, invece, l'asse e la direzione di propagazione sono perpendicolari tra di esse. Come già detto il suono è un segnale, ossia qualcosa che trasporta un informazione che varia nello spazio, in cui si propaga, e nel tempo. Questa informazione può essere immagazzinata, elaborata e trasmessa. Il modo, con cui viene descritta l'informazione sonora, è la sua rappresentazione fisica, ovvero il segnale audio. Il segnale audio è un onda sinusoidale, che evolve nel tempo, caratterizzata da tre elementi: l'ampiezza, la frequenza e la forma d'onda.

L'ampiezza possiamo definirla come l'intensità, la forza di un suono. Nello specifico, può essere misurata in due modi, sia come l'energia trasportata dall'onda, sia in termini di pressione sonora dell'aria, dovuta ai fenomeni di compressione e rarefazione. Nel caso di pressione sonora, l'intensità del suono viene misurata in decibel, tramite una scala logaritmica, il "Sound Pressure Levele (SPL)". Questa scala va a misurare il rapporto relativo che esiste tra l'intensità di un suono p e un suono di riferimento p_0, dato da $2.5 \cdot 10^{-5} Newton/m^2$, che corrisponde alla soglia minima di udibilità dell'orecchio umano per una frequenza di 1 kHz. La relazione logaritmica è, dunque, la seguente: $SPL = 20 \cdot log(p/p_0)$. Tuttavia, la SPL calcola una misura di pressione relativa, mentre nel caso in cui volessimo misurare l'intensità del suono, in termini di energia trasportata, dovremmo adoperare il "Sound Pressure Level (SIL)". Questa scala, sempre in decibel, è data dalla relazione: $SIL = 10 \cdot log(I/I_0)$, dove I è l'intensità del suono da misurare e I_0 è il valore di riferimento, che equivale sempre alla soglia minima di intensità di un suono a 1 kHz. La frequenza è definita come il numero di vibrazioni complete o cicli di compressione e rarefazione compiute nell'unità di tempo.

La frequenza è responsabile dell'altezza di un suono, ossia della percezione di acutezza o gravità . L'altezza, nel dettaglio, è una caratteristica risultante dalla periodicità del suono, cioè dal fatto che un segnale ripeta un certo tipo di andamento per un intervallo temporale. In base alla frequenza, i suoni si possono dividere in: suono puri, costituiti da una semplice sinusoide ad una sola frequenza, e suoni complessi, caratterizzati da un segnale, dove si sommano diverse frequenze. L'orecchio umano può percepire suoni con frequenze che vanno dai 20 ai 20000 Hz.

Infine, la forma d'onda è un parametro che permette di identificare la specifica origine di un suono e di distinguere un suono da un altro, a parità di ampiezza e frequenza. Alla forma d'onda deriva il parametro percettivo del timbro, che consente, dunque, di distinguere un suono, che ha una stessa frequenza e ampiezza, generato da due sorgenti diverse (esempio, chitarra e pianoforte).

Fisiologia dell'udito

Descritta la natura fisica del suono, è importante comprendere come il sistema uditivo umano elabora e percepisce il segnalo audio, andando ad analizzare la fisiologia dell'udito. Il sistema percettivo può essere visto come un modulo di input e output, dove l'orecchio è l'input in cui arriva il segnale audio, e l'output è la comprensione dell'informazione sonora, trasportata, e la ricostruzione di una mappa mentale spaziale delle sorgenti sonore presenti nell'ambiente circostante [52]. L'orecchio è l'organo fondamentale per la percezione uditiva: questo converte le variazioni di pressione dell'area (compressione e rarefazione), prima in vibrazioni meccaniche, e dopo in impulsi nervosi elettrici, elaborati successivamente dal sistema nervoso. L'orecchio, dunque, si suddivide in tre sezioni principali, mostrate in Figura 4.12:

- *l'orecchio esterno*, costituito dal padiglione auricolare e dal canale uditivo, che termina con la membrana del timpano;
- *l'orecchio medio*, costituito da tre ossicini, martello, incudine e staffa;
- *l'orecchio interno*, costituito dalla coclea o chiocciola e terminante con il nervo acustico.

Il segnale audio, in sintesi, entra dall'apertura circondata dal padiglione auricolare, percorre tutto il canale uditivo, arriva nell'orecchio medio, dove, i tre ossicini iniziano a generare movimenti meccanici, trasmessi alla coclea, che invia impulsi nervosi dal nervo acustico al sistema nervoso. Il padiglione auricolare è un componente molto particolare e complesso: infatti è caratterizzato da delle pieghe che hanno lo scopo di "colorare" e amplificare il segnale, in base alla frequenza e alla direzione della sorgente. Questo avviene soprattutto per le frequenze superiori ai 3 kHz, fondamentali per comprensione dei messaggi. Il canale uditivo ha lo scopo di amplificare le frequenze per farle arrivare in modo più efficienti al timpano, attraverso una risonanza tra i 2 e i 3 kHz. L'orecchio medio ha il compito di propagare le vibrazioni del timpano alla coclea, grazie ai movimenti dei tre ossicini. In particolare, l'orecchio medio risolve i problemi dovuti alla resistenza differente, tra l'aria e il fluido interno alla coclea, facendoci percepire le vibrazioni di piccola entità, e, in aggiunta, protegge la coclea da suoni forti a bassa frequenza, che

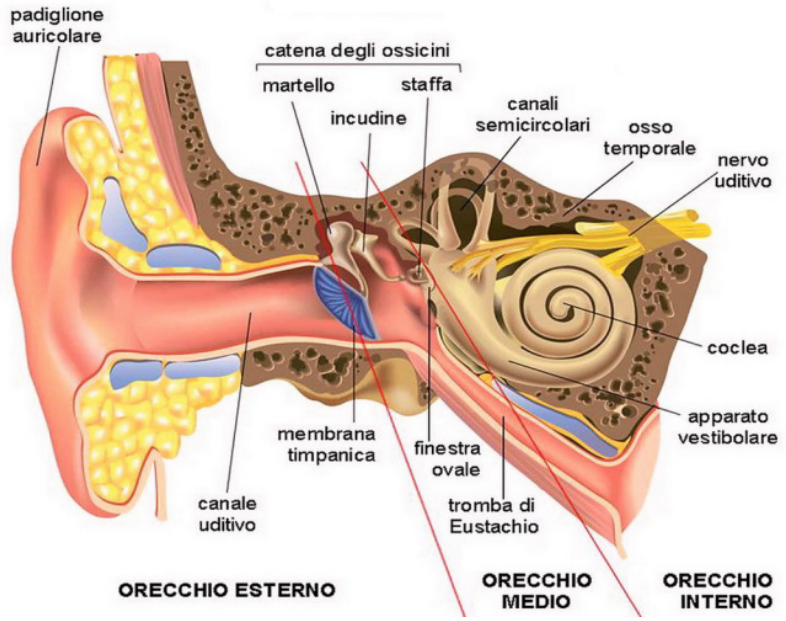

Figura 4.12: L'orecchio umano si suddivide in: orecchio esterno (padiglione auricolare, canale uditivo, timpano), orecchio medio (martello, incudine, staffa), orecchio interno (coclea, nervo acustico). Fonte: https://medicinaonline.co/2017/03/07/orecchio-esterno-anatomia-e-funzioni-in-sintesi/

potrebbero danneggiarla. I due principali componenti dell'orecchio interno sono, invece, i canali semicircolari, che assolvono ai compiti dell'equilibrio, e la coclea, un tubo di 3.5 cm, avvolto a forma di chiocciola, essenziale per la percezione uditiva. La coclea è suddivisa in tre rampe o sezioni, chiamate rispettivamente: rampa vestibolare, rampa media, rampa timpanica, separate da membrane. Tra queste la membrana basilare è il centro per l'elaborazione del segnale acustico e fa spazio *all'organo di Corti*, che con le sue oltre 20 mila cellule cigliate, è responsabile della trasduzione del segnale acustico a segnale elettrochimico, da inviare poi al cervello, tramite il nervo acustico. I tre canali semicircolari, invece, insieme all'utricolo e al sacculo, vanno a comporre la parte vestibolare del labirinto osseo. I canali semicircolari sono denominati anteriore, posteriore e laterale: essi contengono dei recettori deputati ai movimenti rotatori del capo. I recettori, dentro ciascun canale, rispondono ad un determinato movimento: una rotazione orizzontale (come per esempio "dire di no") stimolerà le cellule cigliate, presenti all'interno del canale semicircolare laterale, "dire di si" stimolerà le cellule del canale semicircolare anteriore, e inclinare la testa da un lato ecciterà il canale semicircolare posteriore. L'utricolo e il sacculo sono due sacche membranose, al cui interno le cellule cigliate sono contenute nelle macule, dove è presente una sostanza gelatinosa, in cui sono immersi gli otoliti. I recettori presenti al loro interno danno informazioni riguardo alla forza gravitazionale ed alle accelerazioni di tipo lineare.

Percezione del suono

Innanzitutto è importante descrivere come Il sistema nervoso e quello uditivo percepiscono il segnale audio. Ad ogni grandezza fisica del segnale audio corrispondono delle grandezze percettive. Queste relazioni, che connettono la parte fisiologica con quella percettiva dell'udito, sono molto complesse e non sempre facilmente determinabili [52]. Il suono, percettivamente, è descritto da tre grandezze:

- il volume o loudness, correlato alla percezione dell'ampiezza, intensità del suono;
- la frequenza, responsabile della percezione dell'altezza o pitch di un suono;
- il timbro, come già detto, legato alla forma d'onda del segnale, identifica il tipo di sorgente sonora e consente di distinguere due suoni con la stessa altezza e volume.

La percezione del volume non è uniforme nell'intervallo delle frequenze udibili (20-2000 Hz), in pratica due suoni a parità di ampiezza, vengono percepiti in modo diverso se hanno diverse frequenze. Il diagramma di *Fletcher e Munson* (Figura 4.13) descrive come, al variare delle frequenze udibili, il sistema uditivo percepisce un'intensità costante di un impulso sonoro puro. Dalla curva, si evince come suoni di diversa frequenza siano percepiti con la stessa intensità. Inoltre, dal diagramma si osserva che l'orecchio ha una massima sensibilità percettiva per i suoni compresi tra i 2 e i 5 kHz. I suoni, invece, alle estremità della curva (bassa e alta frequenza) hanno bisogno di un'elevata energia per essere uditi. Il diagramma è importante soprattutto perché va a definire la "soglia di udibilità", ossia quella linea curva, sotto la quale l'udito non percepisce alcun suono. L'altezza di un suono non è un qualcosa che si distingue sempre facilmente: infatti nel caso di suoni puri coincide con la sola frequenza della sinusoide, ma in natura i suoni non sono semplici sinusoidi. Infatti, il suono in natura è un segnale complesso, dato dalla somma di sinusoidi a diversa frequenza, dove l'altezza coincide con la "frequenza fondamentale": questa è distinguibile senza problemi nei suoni armonici[1], mentre, nei casi in cui non sia presente nello spettro del segnale, viene ricostruita dal proprio sistema uditivo ("frequenza fantasma").

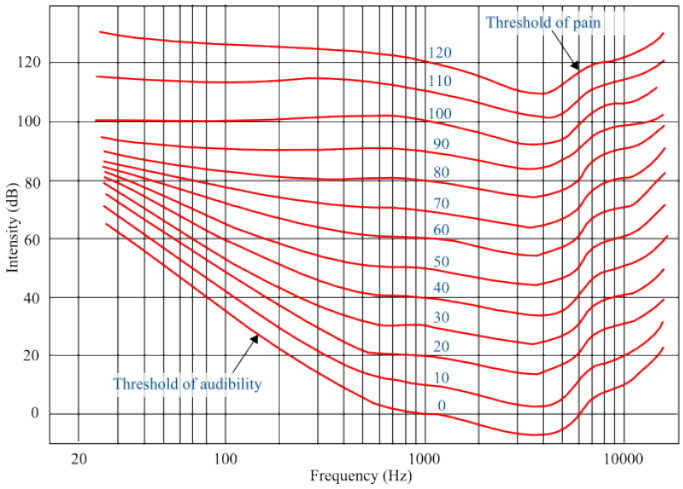

Figura 4.13: Il diagramma descrive, al variare della frequenza, come il sistema uditivo percepisce un'intensità costante di un impulso sonoro puro.

Definite le grandezze percettive, è possibile descrivere come avviene la loro identificazione e secondo quale ordine. In genere, un suono generato nell'ambiente, arriva al proprio orecchio in modo distorto, dovuto alla presenza di ostacoli e oggetti. Questi causano fenomeni quali, la riflessione, la diffrazione e il riverbero[2], che provocano una distorsione della propagazione del suono, come la generazione di versioni ritardate o attenuate dello stesso [53] [52]. Oltre agli ostacoli e agli oggetti dell'ambiente, esistono altri elementi che modificano il suono emesso dalla sorgente, da quello percepito, quali il busto, le spalle, la testa, il padiglione auricolare, del soggetto che ascolta. L'ordine temporale (Figura 4.14) con cui l'orecchio percepisce il suono è diverso per le varie grandezze percettive: infatti l'udito identifica prima (sotto 1ms) la localizzazione e l'intensità di un suono e poi (sopra i 10-30ms) l'altezza e il tipo della sorgente sonora (timbro) [54].

La localizzazione delle sorgenti sonore ha come obiettivo la costruzione di una mappa sonora degli oggetti, presenti nell'ambiente circostante. Il posizionamento di un oggetto nella mappa avviene grazie a tre piani direzionali (Figura 4.15) [52]:

[1] Un suono armonico è caratterizzato da diverse componenti, la cui frequenza è un multiplo intero di una frequenza base, chiamata fondamentale, che hanno ampiezza e fase variabili.

[2] La riflessione è il fenomeno per cui, quando un'onda sonora incontra una superficie di un certo angolo (angolo di incidenza), rimbalza di uno stesso angolo (angolo di riflessione). La diffrazione è quel fenomeno per cui un'onda sonora gira intorno ad un oggetto, le cui dimensioni sono minori o uguali della lunghezza d'onda del suono. Il riverbero è il risultato di onde che si riflettono sulle superfici e sugli oggetti [52].

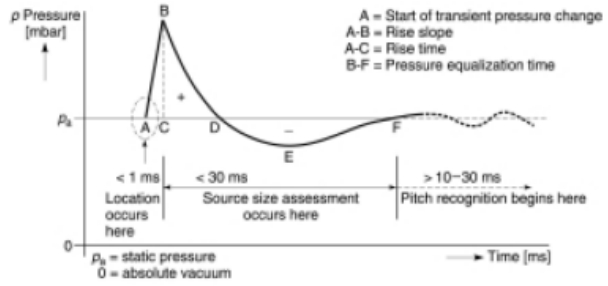

Figura 4.14: Ordine temporale della localizzazione sonora: prima vengono percepiti il luogo della sorgente sonora e l'intensità del suono, poi l'altezza e il timbro.

- piano frontale, direzione fronte-retro;
- piano mediano, direzione sinistra-destra;
- piano orizzontale, direzione sopra-sotto.

La posizione di un oggetto viene espressa, dunque, per mezzo di un vettore caratterizzato da due angoli, azimut (0° fronte, 180° retro) e elevazione (-90° sotto, 90° sopra), e da uno scalare, la distanza. D'altra parte, l'identificazione della direzione sonora avviene tramite due funzioni che descrivono la differenza di percezione dei suoni che arrivano alle due orecchie (audio binaurale): "Interaural intensity difference (IID)" e "Interaural time difference (ITD)", rispettivamente, la differenza di livello di intensità, e di tempo di arrivo (fase) dei suoni, alle due orecchie [52] [53].

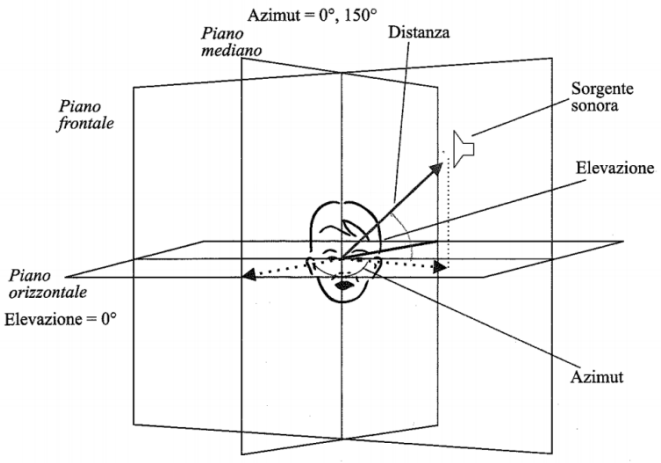

Figura 4.15: Il posizionamento di un oggetto nella mappa sonora avviene grazie a tre piani direzionali: piano frontale, direzione fronte-retro, piano mediano, direzione sinistra-destra, piano orizzontale, direzione sopra-sotto.

La ITD viene rilevata, quando una sorgente non si trova esattamente sul piano mediano: ciò provoca un ritardo di tempo e fase, dovuto al fatto che la distanza percorsa dal suono, per giungere all'orecchio più lontano, è maggiore. Questa distanza, come si vede in Figura 4.16, è circa uguale a $r \cdot (sin(\theta) + \theta)$, dove r è pari al raggio della testa e θ è l'angolo compreso tra la sorgente e il piano mediano.

La IID si definisce, invece, come una differenza di ampiezza o di spettro, dal momento che ad una delle due orecchie non arrivano tutte le frequenze del suono. Ciò accade, poiché la testa svolge il ruolo di "ostacolo", andando a filtrare le diverse frequenze del segnale: nello specifico le alte frequenze (maggiori di 1500 Hz) vengono riflesse, le basse frequenze subiscono diffrazione e girano intorno alla testa dell'ascoltatore. Inoltre, è anche importante andare a considerare

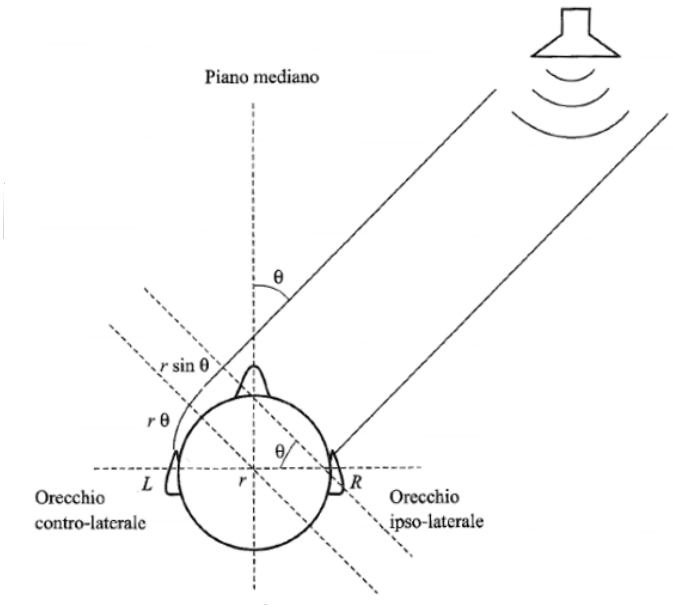

Figura 4.16: La ITD viene rilevata quando una sorgente non si trova esattamente sul piano mediano: ciò provoca un ritardo di tempo e fase, dovuto al fatto che la distanza percorsa dal suono per giungere all'orecchio più lontano è maggiore.

l'angolo in cui si va a trovare una sorgente sonora. Per le sorgenti collocate di fronte al soggetto (0°) o alle spalle (180°) le differenze interaurali risultano minime sul piano mediano, provocando uno stato confusionale nel soggetto. Questo fenomeno descritto si chiama "cono di confusione". Per i suoni localizzati intorno a (+/-)45° e a (+/-)135° abbiamo la più larga differenza interaurale. Per la localizzazione di sorgenti collocate su diversi piani verticali entra in gioco la conformità del padiglione auricolare. Questo, essendo in grado di riflettere meglio i suoni provenienti dal fronte piuttosto che da sopra, presenta una risposta percettiva molto più pronunciata, per sorgenti poste davanti al soggetto, rispetto a quelle poste superiormente. Infine, l'individuazione della distanza della sorgente sonora è l'aspetto più complicato della percezione uditiva, rispetto alla localizzazione sul piano orizzontale e verticale. Per distanze al di sopra 1.5m l'orecchio fa leva sopratutto sull'intensità sonora, mentre, al di sotto di tale valore l'ITD presenta maggiore rilevanza.

Fino a questo punto sono state descritte le due funzioni di percezione direzionale del suono, in caso di una sola sorgente sonora. Quando, invece, all'orecchio arrivano segnali sonori da molteplici sorgenti, è possibile avere una diversa percezione direzionale. In particolare, il cervello riesce a fondere tutti i suoni che arrivano all'orecchio entro i 30, massimo 50ms (oltre percepisce l'eco), andando a enfatizzare la sorgente sonora più forte o quella che giunge prima alle orecchie. Questo fenomeno fisico prende nome di effetto di precedenza o "effetto Haas", e va a definire una curva dove la percezione direzionale di più sorgenti, dipende dal ritardo temporale (ITD) e dalla differenza di intensità sonora (IID). Come si evince dalla Figura 4.17, sotto un ritardo dei 0.65 ms (circa 1500 Hz), l'udito percepisce la sorgente sonora che ha un'intensità più forte, mentre, con un ritardo temporale maggiore, localizza la sorgente che prima arriva alle nostre orecchie, a patto che la IID sia minore ai 12dB.

Definiti, quindi, gli aspetti percettivi dell'udito, è possibile introdurre delle metodologie scientifiche, quali l'Audiometria, per analizzare le capacità uditive di un soggetto.

Audiometria

L'audiometria è quella parte dell'Audiologia che studia la funzione uditiva, mediante l'impiego di apparecchiature e metodiche, che necessitano della collaborazione attiva da parte del paziente (audiometria soggettiva) o che si avvalgono di risposte biologiche allo stimolo acustico, indipendenti dalla volontà del paziente (audiometria obiettiva) [57]. L'audiometria soggettiva

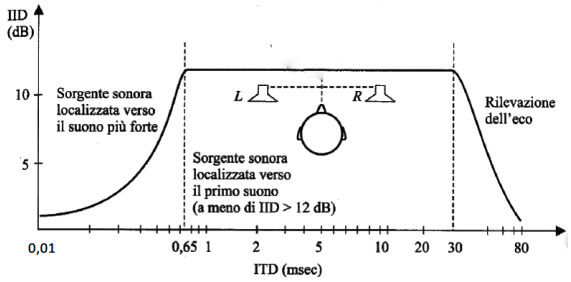

Figura 4.17: In presenza di molteplici sorgenti sonore in posizioni diverse, viene percepita una direzione che corrisponde: alla prima sorgente che arriva alle orecchie (sotto la curva) o alla sorgente sonora localizzata verso il suono più forte (sopra la curva).

comprende l'audiometria tonale, vocale. Per quanto riguarda l'audiometria tonale, è importante discutere nello specifico di quella "tonale liminare", la quale permette di valutare la soglia uditiva, frequenza per frequenza, impiegando stimoli sonori di intensità liminare (livello minimo di udibilità dei suoni puri percepibili dall'orecchio umano). In sintesi, l'audiometria tonale liminare, ha lo scopo di ricercare la soglia uditiva per i toni puri, che vengono presentati ad intensità liminare nel campo di frequenze da 125 Hz (pitch maschio adulto) a 8 kHz, in circa intervalli di ottava (ad ogni ottava corrisponde un raddoppio della frequenza). L'esame viene eseguito tramite un generatore di segnali acustici, l'audiometro, tarato in "decibel hearing level[3]" (dB HL). Nell'esame tonale per via aerea il paziente viene posto all'interno di una cabina insonorizzata, dove riceve i toni puri, separatamente per ciascun orecchio, attraverso l'uso di cuffie. Il risultato dell'esame è l'audiogramma, un grafico che va descrivere l'immagine del proprio udito, tracciando una curva che per ogni punto indica l'intensità sonora udita (soglia di udibilità) ad una certa frequenza, tra i 125 e 8000 Hz. Si prosegue, dunque, a calcolare la "Pure Tone Average (PTA)", che fa riferimento alla media dei livelli di soglia uditiva, rispetto a delle specifiche frequenze, tipicamente 500, 1000, 2000 e 4000 Hz. L'audiometria tonale liminare è il primo accertamento a cui è sottoposto un soggetto ipoacusico[4] in fase di diagnosi e che fa porre in sede preliminare un'eventuale indicazione alla protesizzazione. In generale, si considera clinicamente normoudente un soggetto con una soglia (PTA) entro i 20-25 dB HL. Un livello di soglia (PTA) pari a 95 dB HL è considerato invece il limite oltre quale un paziente ha un utilizzo praticamente nullo del canale uditivo.

L'audiometria vocale, a differenza di quella tonale, ha lo scopo di verificare qual è la reale menomazione che l'ipoacusico ha nel percepire il messaggio verbale, quindi, accertare la capacità di riconoscere e capire parole e frasi di una lingua [59] [60]. Consente di stabilire l'intelligibilità verbale, ossia il grado di riconoscimento delle parole come stimolo sonoro dotato di significato. Per eseguire questo esame, c'è bisogno di un materiale che rispetti alcune specifiche, quali composizione fonetica tipica della lingua del soggetto testato, bilanciamento fonetico e uso di termini semplici, comuni e familiari. Prima dell'esame, al paziente viene detto a quale tipologia di messaggi verbali verrà sottoposto. Nello specifico, questi messaggi consistono in una lista di parole, quali parole monosillabiche, bisillabiche, frasi, termini privi di significato (logotomi). In genere vengono usate le parole bisillabiche a senso compiuto, mentre, i logotomi (esempio reva, mebo, lome ecc.) servono per evidenziare eventuali deficit di discriminazione fonetica. Durante l'esame, il paziente ha il compito di ripetere la serie di messaggi che gli viene somministrata, attraverso diverse vie (in cuffia, per via ossea, in campo libero). Nell'audiometria vocale possono esserci anche dei rumori di mascheramento, come:

- "White Noise (Rumore Bianco WN)", segnale non periodico nel tempo, di ampiezza costante su tutto lo spettro di frequenze;

[3] L'*hearing level* è un sound pressure level (SPL), prodotto da un audiometro ad una specifica frequenza, misurato in decibel, in riferimento allo zero audiometrico [58].

[4] L'ipoacusia è l'indebolimento dell'apparato uditivo dovuto a un danno o alla degenerazione di uno o più dei suoi componenti [61].

- "Pink Noise (Rumore rosa PN)", con energia uguale per ogni ottava su tutte le frequenza (125 - 8000 Hz);
- "Speech Noise (SPN)", con energia uguale per tutte le frequenze specifiche della voce;
- rumore "cocktail party", che simula le condizioni acustiche di fondo di una festa;
- rumore "babble", dove vengono sovrapposte voci di interlocutori diversi per produrre un fattore di interferenza maggiore rispetto al rumore casuale senza voci.

Inoltre, un aiuto al soggetto, durante il test, può giungere dalla ridondanza, definita come la quantità di informazioni in eccesso, rispetto a quelle richieste per il riconoscimento del messaggio verbale. La ridondanza si suddivide in estrinseca ed intrinseca. La prima è legata esclusivamente al contenuto del messaggio verbale, secondo tre livelli: fonetico (contenuto fonetico del messaggio), sintattico (struttura grammaticale del messaggio) e semantico (significato del messaggio). La seconda, invece, è una funzione del sistema nervoso centrale e subentra per la correzione di eventuali errori nell'identificazione del messaggio. Alla fine dell'esame si contano il numero di parole esatte, presenti nella lista (10-20), e i risultati ottenuti vengono tracciati su un diagramma, dove sulle ascisse è indicata l'intensità in dB e sulle ordinate è riportata la percentuale di risposte esatte. Dal grafico si evidenziano poi tre soglie di intensità percepite:

- "soglia di detezione", corrisponde al valore di intensità sonora in cui il paziente percepisce il messaggio, ma non è in grado di ripetere quello che ha sentito. Nei soggetti normoudenti tale soglia è a 0 dB;
- "soglia di percezione", dove il soggetto percepisce il significato corretto del 50% dei messaggi. Nei soggetti normali tale soglia è situata a 10 dB per le frasi, 15 dB per le parole, 20 dB per i logotomi;
- "soglia di intellezione", dove il soggetto percepisce il significato corretto del 100% dei messaggi. Nei soggetti normali tale soglia viene raggiunta a 20 dB per le frasi, 25 dB per le parole, 30 dB per i logotomi.

Infine, viene tracciata una curva a forma di S italica sull'audiogramma, chiamata curva di articolazione o di intelligibilità. Tale curva è usata per fare delle valutazioni sulla discriminazione vocale, in base a due criteri: uno qualitativo, dove, il livello della soglia di percezione vocale (50%) del paziente, viene paragonato a quello ottenuto per lo stesso materiale fonetico nei normo-udenti, e uno qualitativo, che serve a valutare la gravità di un'eventuale patologia. Le curve tracciate, inoltre, possono essere di vario tipo, le più generiche sono:

- "curva raddrizzata", ha una forma ad S, ma è meno inclinata della curva normale. Si reperisce in genere nelle ipoacusie trasmissive con una perdita prevalente nelle frequenze gravi;
- "curva parallela", parallela alla curva normale e spostata verso destra, si riscontra nelle ipoacusie trasmissive pantonali(problemi nella percezione dei suoni in tutte le frequenze).

Apparato vestibolare e rieducazione

La principale funzione dell'apparato vestibolare è il controllo dell'equilibrio, ovvero esso si occupa del mantenimento di un corretto rapporto fra un individuo e lo spazio circostante, in relazione alle esigenze di movimento dello stesso. Nel libro "La terapia riabilitativa nei disturbi dell'equilibrio" [55], l'equilibrio viene descritto come il "sesto senso" dell'uomo, ed è cosi importante per una serie di funzioni essenziali, quali il controllo visivo dell'ambiente, il controllo della postura statica e dinamica, la regolazione dei riflessi neurovegetativi, la coscienza della situazione, l'orientamento spazio-temporale e il benessere psicologico. L'equilibrio non è affidato ad un solo organo o apparato, ma ad una serie di strutture comunicanti, come sensori e organi periferici e il sistema nervoso centrale. Il sistema dell'equilibrio è molto sensibile e plastico, capace di adattarsi a diverse condizioni fisiologiche e patologiche, tramite una serie di meccanismi, quali:

- meccanismi di feedback, ovvero la capacità di autoregolarsi ad una modifica interna o esterna al sistema;
- meccanismi di feedforward, che usano modelli di comportamenti precostituiti, per prevedere la giusta risposta ad un'azione futura;
- ridondanza, sia degli input (sensoriali) che degli output (motori);
- capacità di memorizzare le caratteristiche principali di alcuni input, da riutilizzare nella programmazione di risposte successive.

Dunque, il sistema nervoso centrale accumula tutte le varie informazioni provenienti dai sensori periferici (vista, udito, sensori propriocettivi), memorizzandole ed elaborandole. L'elaborazione avviene attraverso l'utilizzo dell'esperienza, della memoria, andando così a programmare la giusta strategia motoria (output), per adattarsi al contesto attuale e creare uno schema per prevedere situazioni future. Quando è presente una lesione, che può essere localizzata a livello dei sensori periferici, del sistema nervoso o degli output motori, il sistema dell'equilibrio, in base alle sue caratteristiche, dovrebbe adattarsi in modo rapido alla situazione patologica, grazie a dei meccanismi centrali di ricalibrazione. Questi meccanismi prevedono una variazione dell'importanza delle informazioni sensoriali, la creazione di nuove strategie comportamentali e l'immagazzinamento delle nuove esperienze sensoriali ed emotive. Quindi, la presenza di una situazione patologica, con il passare del tempo, porta l'instaurarsi di nuovi meccanismi di risposta automatica con una riduzione dei riflessi lesionati e un aumento delle risposte a particolari input. Inoltre, la necessità di rendere stabile nel tempo l'adattamento alla patologia prevede l'attivazione di processi di apprendimento e di memoria, facilitando il rapido ed efficace adeguamento comportamentale alle nuove condizioni post lesionali.

Nei casi con difficoltà cronica di adattamento ad una vestibolopatia, i risultati della terapia farmacologica o chirurgica sono spesso deludenti e ciò ha condotto alla ricerca di nuove strade, come la terapia riabilitativa. Lo scopo della riabilitazione non è la guarigione anatomica di una patologia, ma il ripristino delle funzioni alterate, sfruttando le proprietà adattative e le capacità di apprendimento del sistema nervoso centrale [55]. In sintesi, è necessario riprogrammare, rieducare la funzione dell'equilibrio, prendendo in considerazione sia i sistemi colpiti che quelli non colpiti dalla patologia. Le tecniche riabilitative hanno come obiettivo il controllo della postura e della marcia, mirano a migliorare le funzioni cognitivo-comportamentali (orientamento spazio-temporale) e la mobilità degli occhi (oculomotilità). Di seguito, vengono riportate le soluzioni, i protocolli più interessanti, presenti in letteratura [55].

- Il protocollo di Cawthorne e Cooksey è il primo protocollo che propone una serie di esercizi per la riabilitazione delle vertigini di origine vestibolare. La terapia è suddivisa in quattro gruppi (esercizi a letto, seduti, in piedi, in movimento) e richiedono l'uso di una palla, di un piano inclinato e una scala a tre gradini. Il protocollo prevede l'ausilio di un assistente per eseguire gli esercizi.
- La tecnica di Boite prevede una serie di esercizi statici o dinamici. Nel primo caso il paziente viene posizionato vicino ad una parete e gli viene richiesto di controllare le oscillazioni posturali, durante la stazione eretta, in quattro posizioni (parete davanti, dietro, a destra e a sinistra), mentre, nel secondo caso il paziente dovrà eseguire una marcia sul posto con le braccia tese in avanti, sempre passando per le quattro posizioni. Il cambio tra una posizione e quella successiva avviene solo quando non riesce a toccare la parete per almeno 20 secondi.
- La Marcia su Percorsi Memorizzati (NAT) è una tecnica che punta soprattutto al potenziamento delle capacità di analisi e memorizzazione spaziale. Si fa leva sull'abilità di relazionare gli input vestibolari e propriocettivi con gli spostamenti spazio-temporali effettuati. In pratica il paziente deve visualizzare un percorso prestabilito (Figura 4.18) di forma geometrica semplice (triangolo, quadrato, ecc.) o complessa (traiettorie segmentate), assimilarlo e successivamente effettuarlo, una prima volta a occhi chiusi, altre due tre volte a occhi aperti ed infine di nuovi con gli occhi chiusi. E' bene che nella stanza non ci siano ostacoli pericolosi, sorgenti sonore o luminose, in grado di facilitare le scelte.

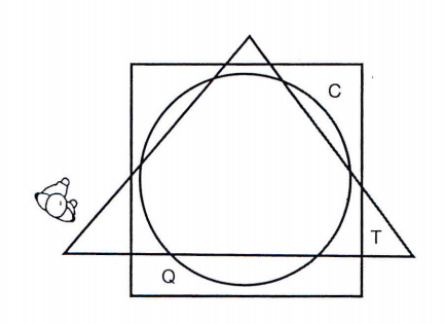

Figura 4.18: Esempio di percorsi da memorizzare di forma geometrica semplice o complessa.

- La Piattaforma Stabilometrica statica o dinamica è uno strumento che può essere applicato sia in ambito rieducativo che diagnostico, per misurare la stabilità di un paziente e la sua strategia posturale. La piattaforma stabilometrica è una pedana munita di tre sensori di pressione, posti ai vertici di un triangolo equilatero. Il segnale che viene rilevato dai sensori viene poi convertito da analogico in digitale, per essere acquisito da un elaboratore elettronico, che analizza i dati, li inserisce in grafici e li archivia. Lo strumento è affiancato dall'ausilio di un monitor, posto ad altezza occhi, per effettuare diversi esercizi e valutazioni, eseguiti ad occhi aperti e chiusi. L'esercizio con le "immagini stabilizzanti", consiste nell'osservare (sul monitor), posti sulla pedana, un filo a piombo bianco su sfondo nero. Questo consente di migliorare il controllo delle oscillazioni posturali, soprattutto sul piano frontale. Nell'esercizio a "cerchi concentrici", il paziente deve mantenere il suo baricentro (definito da una linea bianca sul monitor) all'interno di cerchi concentrici, per migliorare il controllo posturale statico. Altro esercizio è quello delle "mire visive", dove il paziente, posto sulla piattaforma, impara a controllare gli spostamenti volontari del suo centro di pressione, rappresentati graficamente dalla traiettoria effettuata da un apposito marker (ad esempio una crocetta o un pallino). Viene, quindi, invitato a cercare di "colpire" con questo simbolo una serie di 20 target (ad esempio, bersagli circolari), che compaiono progressivamente in modo randomizzato in varie posizioni del monitor, effettuando unicamente variazioni di postura (baricentro), senza spostare i piedi dalla posizione di base. Ciò implica movimenti complessi e strategie posturali diverse da un caso all'altro. Al termine di ogni test (in genere con 20 bersagli) viene fornito uno score numerico che valuta le performance del paziente e consente il monitoraggio oggettivo dei risultati. Vengono indicati il tempo impiegato per completare l'esercizio ed il numero di obiettivi colpiti. L'esame stabilometrico è notoriamente semplice per il paziente ma complesso per l'interpretazione medica. Si valutano dunque una serie di parametri (Figura 4.19), quali [56]:
  - "X medio e Y medio", espressi in mm, rappresentano rispettivamente il punto medio delle oscillazioni sul piano frontale (destro-sinistro-posteriore) e sagittale (anteroposteriore) e forniscono le coordinate del centro di pressione (COP).
  - "Superficie (S)", rappresenta la superficie dell'ellisse, espressa in mm^2, che contiene il 90% dei punti campionati ed esprime la precisione del sistema posturale.
  - "Lunghezza (L)", rappresenta il percorso globale, espresso in mm, del centro di pressione sulla piattaforma ed è un indice dell'energia spesa dal sistema.
  - "Velocità inedia (Vm)", ossia la velocità media degli spostamenti, espressa in mm/s. In particolare, la relativa deviazione standard fornisce indicazioni sulla omogeneità degli spostamenti.
  - "Lunghezza Funzione della Superficie (LFS)", funzione di correlazione tra L e S. In condizioni normali dovrebbe essere all'incirca uguale a 1.
  - "Trasformata rapida di Fourier (FFT)", per valutare in frequenza separatamente le oscillazioni sul piano frontale, asse X, e sul piano sagittale, asse Y.
  - "Indice di Romberg (IR)", è il quoziente tra i valori misurati ad occhi chiusi e i corrispondenti valori ad occhi aperti. Studia quindi l'influenza della visione sulla postura.

– "Modulo dello stabilogramma", esprime in mm la distanza percorsa in ogni istante di campionamento (Grafico Gomitolo).
– "Statokinesigramma (SKG)" , rappresenta graficamente lo spostamento reale del centro di pressione in riferimento all'appoggio plantare. Con lo SKG esiste la possibilità di evidenziare direttamente eventuali spostamenti patologici del centro di pressione.

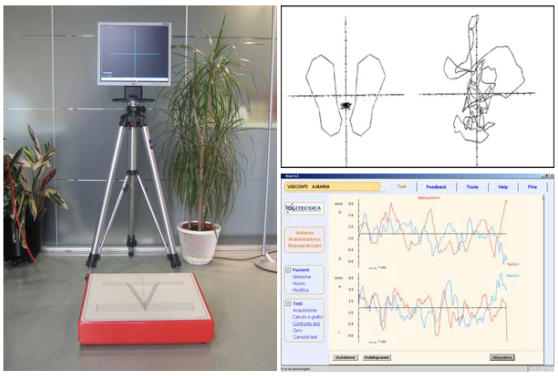

Figura 4.19: A sinistra la pedana stabilometrica, con il monitor di ausilio posto ad altezza occhi (fonte http://posturologiaitalia.it/). A destra, in alto, lo statokinesigramma, che rappresenta la proiezione a terra del baricentro o centro di pressione, in riferimento alla piattaforma (sinistra) e allo spostamento in mm. del baricentro (a destra). A destra, in basso, lo stabilogramma, che visualizza la componente x (oscillazioni sul piano laterale) e la componente y (oscillazioni sul piano sagittale) [56].

Navigation

Con il termine navigation è possibile intendere la capacità di un soggetto di sapersi muovere all'interno di un ambiente in modo appropriato, seguendo un obiettivo. La navigation, come già accennato, è legata essenzialmente alle capacità propriocettive, al sistema visivo, ed infine al sistema vestibolare. In [62] affermano che la strategia dell'essere umano nel cercare un percorso si basa su due fattori distinti: l'abilità di rilevare ostacoli e impedimenti all'interno dell'ambiente circostante, e la capacità di spostarsi (navigation) verso destinazioni remote, non visibili e percepibili nell'istante corrente. La navigation, dunque, riguarda quel processo in cui un soggetto, instante per istante, deve aggiornare la sua posizione attuale e l'orientamento, rispetto a un percorso prestabilito e una destinazione desiderata, ed essere capace di non perdere la direzione e di stabilire una nuovo tragitto, in caso di smarrimento. Le metodologie di navigation si possono suddividono in tre categorie, in base a come si ottengono ed elaborano le informazioni di posizione e orientamento:

- navigazione basata sulla posizione ("piloting"), in cui un soggetto si orienta grazie a segnali esterni;
- navigazione basata sulla velocità ("dead reckoning o path integration"), dove il viaggiatore ha a disposizione informazioni esterne o propriocettive riguardo alla sua velocità, utili per conoscere l'orientamento e lo spostamento relativo;
- navigazione basata sull'accelerazione ("inertial navigation o path integration"), in cui una persona sfrutta le informazioni di accelerazione lineare e angolare, per ottenere il suo spostamento relativo e la direzione;

Da recenti studi, è stato dimostrato come l'ippocampo sia coinvolto nei processi della la memoria spaziale, topografica, atti nel calcolare possibili percorsi più o meno complessi per raggiungere una data destinazione [63]. Inoltre, anche il sistema vestibolare ha un ruolo specifico nel processo di orientamento: infatti è stato osservato un deficit della memoria spaziale e della navigation in persone affette da deficit vestibolari bilaterali cronici. La navigazione spaziale, dunque, richiede una continua rappresentazione dei movimenti dell'individuo all'interno dello spazio

tridimensionale, dove le informazioni spaziali (coordinate) sono fornite dall'apparato vestibolare, oltre che dalla vista. Quest'ultimi provvedono a inviare gli stimoli, che servono a creare, codificare delle mappe cognitive dell'ambiente.

In [64] la navigation viene vista come un'attività complessa, psico-senso-motoria, definita da varie capacità di un soggetto, quali:

- percezione della propria posizione rispetto alla gravità (orientamento geocentrico);
- percezione della geometria corporea (orientamento allocentrico);
- percezione della propria posizione nello spazio (orientamento eterocentrico);
- saper rilevare le caratteristiche dell'ambiente circostante con i propri punti di repere[5];
- identificare la posizione di un obiettivo da raggiungere, programmare il percorso corretto ed effettuare il movimento adatto.

Per valutare la navigation e l'orientamento spaziale di un soggetto esiste in letteratura un test, mutuato dal metodo Terzi e standardizzato da Cesarani, comunemente chiamato il **Test di Cesarani**. Il test si suddivide in due parti, esecuzione e riproduzione. Nella prima fase il soggetto testato deve eseguire, bendato, una serie di comandi, che gli vengono impartiti o a voce dall'esaminatore o attraverso un dispositivo. Questi comandi vanno a definire un percorso standard per terra (Figura 4.20), che il soggetto dovrà memorizzare, per crearsi una mappa mentale della sua posizione e dei suoi spostamenti. La seconda fase consiste in una prova spaziale, in cui al soggetto viene chiesto di riprodurre con carta e penna il percorso fatto.

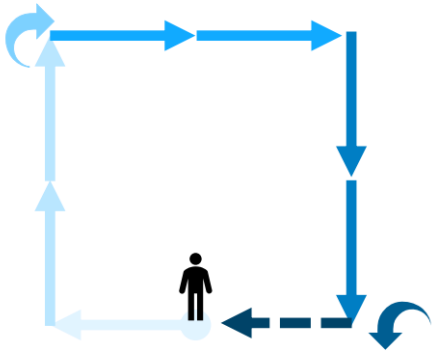

Figura 4.20: Percorso che il paziente esegue sotto il comando vocale e che dovrebbe essere in grado di riprodurre.

Nella Tabella 4.1 sono illustrati i comandi da eseguire con i rispettivi punti per l'esecuzione e la riproduzione. L'ultimo comando "ritornare nella posizione di partenza" verifica la capacità di orientamento del soggetto. Poiché è previsto nel test che il soggetto faccia delle rotazioni, anche complete, è possibile che tenda a deviare la sua direzione, sia verso destra che sinistra. Pertanto nella valutazione oltre al punteggio si tiene conto con un simbolo "+" delle deviazioni verso destra, con il simbolo "-" delle deviazioni verso sinistra. Il punteggio massimo dell'esercizio è 20: in genere un soggetto normale varia tra i 18 e i 20 punti, con un angolo di deviazione nel comando finale di ritorno di 40° destra o sinistra, senza avere una prevalenza di una delle due deviazioni. Per la riproduzione invece il punteggio normale è compreso tra 15 e 20. Nei pazienti con disequilibrio si osservano difficoltà sia nel ritornare al punto di partenza, con deviazione superiore ai 60°, sia nel riprodurre il percorso, dando origine a disegni bizzarri.

[5] "Per indicare con precisione la posizione di un organo o la localizzazione di un sintomo, ci si riferisce ad una serie di punti e linee che sono individuabili utilizzando le parti dello scheletro apprezzabili durante un'esplorazione superficiale del corpo. Sono tali le linee e i punti di repere [65]."

Comandi	Esecuzione Motoria	Riproduzione su Carta
Fare un passo laterale a sinistra	2 punti	2 punti
Fare due passi avanti	4 punti	4 punti
Ruotare di 90° a destra	1 punto	5 punti
Fare due passi avanti	4 punti	4 punti
Fare due passi laterali a destra	4 punti	4 punti
Ritornare nella posizione di partenza	1 punto	1 punto

Tabella 4.1: Test di Cesarani: comandi e rispettivi punti, per la prova di esecuzione motoria e di riproduzione su carta.

In conclusione il test, pur essendo molto semplice, va ad analizzare alcuni processi cognitivi complessi, quali:

- capacità di eseguire semplici comandi motori;
- capacità di costruire mappe mentali;
- memoria a breve termine;
- rappresentazione spaziale.

4.1.7 Obiettivo del lavoro di tesi

Dall'analisi della letteratura si osserva che, sebbene in ambito audiologico si parli ampiamente dell'importanza dell'orientamento spaziale e della memoria topokinetica, nonché delle strette relazioni che queste due funzioni (riassumibili con il termine navigation) hanno con l'apparato vestibolare, i protocolli clinici di valutazione ed allenamento sono particolarmente lacunosi e non sono oggettivabili con misure specifiche. Esempio calzante è il Test di Cesarani, il quale risulta essere una valutazione in ambito navigation estremamente semplice da eseguire e facile da apprendere, inficiandone la bontà dei risultati laddove si abbia la necessità di più rivalutazioni nel tempo. Questa problematica si rileva anche nel test della marcia su percorsi memorizzati, in cui il percorso da eseguire si limita alle tre figure geometriche del cerchio, del quadrato e del triangolo e dunque non prende in considerazione l'abilità di riprodurre, sia a livello motorio che "su carta", mappe "complesse" ovvero composte, come avviene nella realtà, da sequenze di cambi direzionali (vettori) caratterizzate da più elementi. Da queste valutazioni, dunque, è stato definito l'obiettivo del lavoro di tesi, ovvero di proporre l'utilizzo del sistema, robot più tracking HTC, inserendolo quale protocollo di analisi e d'allenamento delle funzioni, uditive (localizzazione sonora), vestibolari e relative alla navigation, in alternativa a quanto ora presente in letteratura.

Prima di analizzare in dettaglio il lavoro è inoltre necessario evidenziare alcune premesse. Innanzitutto bisogna sottolineare che essendo il sistema un qualcosa di ex-novo, mai usato in ambito audiologico, non esistono in letteratura protocolli valutativi simili, normati e misurabili, con i quali fare confronti. In secondo luogo, è stato possibile avere a disposizione gli strumenti in ambito ospedaliero solo per un breve lasso di tempo e l'analisi è stata eseguita prima su una popolazione non patologica il più omogenea possibile, dal momento che è buona norma valutare gli effetti di un qualsiasi protocollo clinico, partendo da soggetti sani, proseguendo eventualmente su una popolazione patologica. Dunque, è stato proposto un protocollo di training, breve ed intenso, quale studio pilota per gettare le basi per il possibile sviluppo di futuri protocolli di allenamento e riabilitazione, oggettivi, misurabili e adattabili alle specificità dei soggetti, facendo uso del medesimo sistema, robot più tracking. In sintesi, sono stati valutati i pro e i contro della metodologia in oggetto, delegando ad una fase successiva l'eventuale sperimentazione con soggetti patologici. A questo proposito si ricorda che il concetto di exergame, laddove applicato ad una pratica riabilitativa, presume la ripetitività del compito da eseguire durante un lasso temporale prestabilito al fine sia di valutarne gli effetti nel tempo, sia di verificare che i risultati di tale esercizio siano stabili nel tempo.

Analizzate queste premesse, il lavoro di tesi si è posto due obiettivi principali: da un lato, quello di realizzare un nuovo test standardizzato misurabile ed oggettivo in ambito della navigation (ponendolo a confronto con il Test di Cesarani), dall'altro di di ideare un nuovo protocollo riabilitativo adattabile alle specificità del paziente nei termini di complessità dei percorsi proposti ed al contempo misurabile (per poter tener traccia dei progressi in itinere).

Per far ciò è stata considerata una popolazione sana che soddisfacesse il criterio di omogeneità dei soggetti. Tale popolazione è stata suddivisa in due gruppi (studio e controllo) che sono stati monitorati attraverso le variazioni di alcuni indici relativi alle funzioni uditive, vestibolari e di navigation.

4.2 Architettura del sistema

L'architettura del sistema (Figura 4.21) si suddivide nei seguenti componenti:

- l' "Unità logica di gioco";
- il robot Jumping Sumo;
- il dispositivo Bluetooth per la riproduzione audio;
- il "Modulo di comunicazione", tra l'Unità logica e il Jumping Sumo;
- il "Sistema di acquisizione dati e informazioni" per la posizione e l'orientamento, del robot e del giocatore.

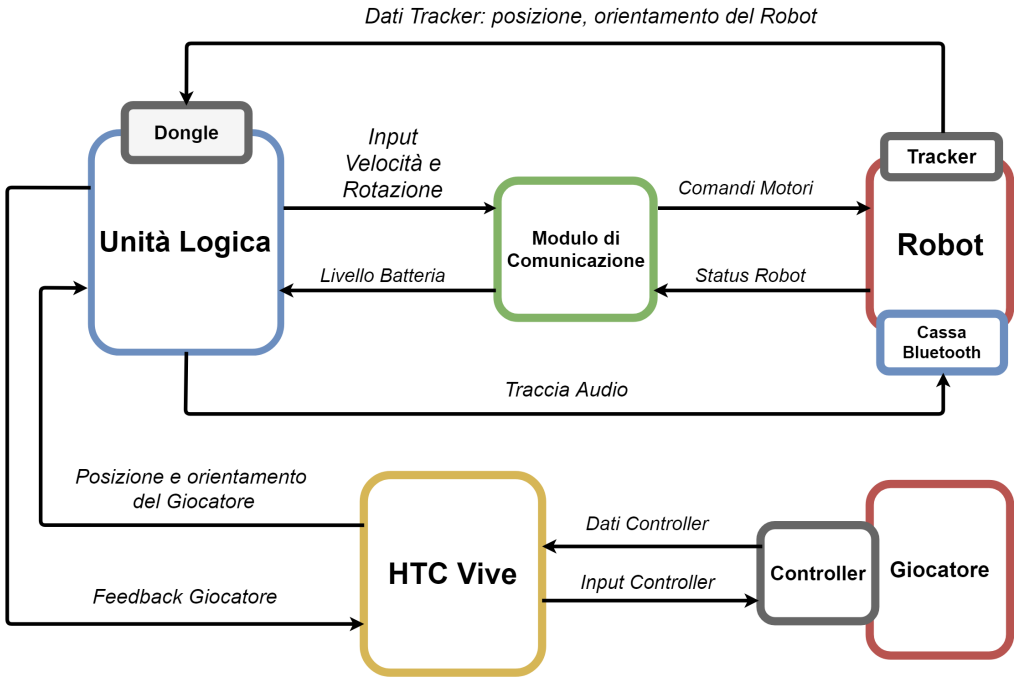

Figura 4.21: Architettura del sistema sviluppato.

L'Unità logica è l'applicazione sviluppata in Unity (paragrafo 3.2.2). Questa ha lo scopo di gestire e controllare la logica di gioco. L'unità, in base alle informazioni che riceve, invia dei comandi ai vari dispositivi del sistema di gioco. Queste informazioni sono dati che riguardano la posizione e l'orientamento, sia del robot che del giocatore. Il Jumping Sumo (paragrafo 3.1.1), come già accennato, è stato accessoriato con un Vive Tracker e una cassa Bluetooth (Figura 4.22). Il Vive Tracker invia le informazioni di posa del robot, tramite il dongle, che comunica in modo diretto con l'unità logica, mentre, il giocatore ha fatto uso del controller come dispositivo

di tracciamento, per due motivi: il primo è quello di cercare di sfruttare tutti i dispositivi Vive già a disposizione, senza aggiungerne altri; il secondo motivo nasce dal fatto che il controller è stato usato nell'applicazione per dare feedback aptici al giocatore, e dunque era logico sfruttare questo dispositivo anche per il tracciamento, senza costringere il giocatore stesso ad indossare altri oggetti/accessori ingombranti. I dati del Vive Tracker arrivano grazie al dongle, mentre le informazioni dei controller giungono tramite il sistema del Vive (paragrafo 3.1.2) (base station). La cassa Bluetooth, invece, riceve dall'unità logica la traccia audio da riprodurre. Per comunicare con il robot, l'unità logica si affida al un modulo di comunicazione, che fa da intermediario tra i due sistemi. Questo modulo esegue la libreria Java per il Jumping Sumo (paragrafo 3.2.1): riceve i comandi di velocità e rotazione, inviandoli al robot, e ottiene da quest'ultimo eventuali informazioni sullo status (esempio, livello batteria).

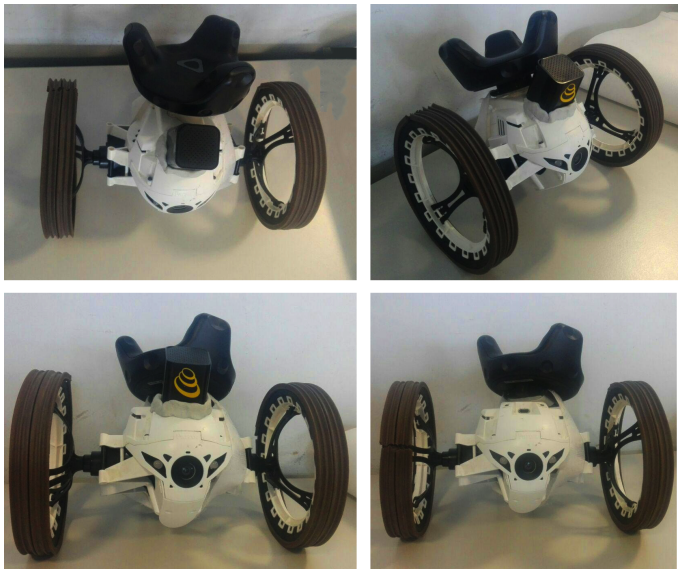

Figura 4.22: Accessori installati sul Jumping Sumo: Vive Tracker e cassa Bluetooth.

4.3 Realizzazione

4.3.1 Premesse

Il protocollo realizzato è stato somministrato a soggetti non patologici. Questo ha comportato che i vari esercizi e test di valutazione fossero più complessi rispetto a quelli che si andrebbero a sviluppare per persone patologiche. In tal modo, gli utenti sani sono stati messi in difficoltà per avere la possibilità di ottenere un cambiamento significativo degli indici: infatti, in caso di esercizi troppo semplici e facili, si sarebbe potuta inficiare la bontà e la validità del protocollo. Infine, i soggetti hanno lavorato su un piano di ascolto atipico, poiché sono stati obbligati a concentrasi sui suoni e i movimenti del robot, che si è trovato su un piano (da terra, piano del pavimento) totalmente diverso a quello a cui sono abituati (piano delle orecchie).

4.3.2 Sviluppo del protocollo

Per prima cosa è stato valutato lo spazio di lavoro a disposizione: dal momento che c'era la possibilità solo di muoversi in un ambiente ospedaliero di circa 3×2.5 metri, è stata stabilita un'area di gioco rettangolare di 2.5×2.0 metri, lasciando una "cornice" di 25 cm intorno a ciascun lato, in modo da avere sufficiente spazio di overshoot per il Jumping Sumo e il giocatore (Figura 4.23). In base alle dimensione scelte è stato considerato come riferimento generale un passo del giocatore di circa 50 cm. I soggetti testati hanno un'età compresa, tra i 20 e 35 anni, normoacustici, ovvero che abbiano superato l'esame audiometrico tonale (paragrafo 4.1.6), con

una soglia uditiva (PTA) al di sotto dei 20-25 db HL. Nel protocollo è stato incluso sia l'allenamento per le funzionalità vestibolari e relative alla navigation che il test per la navigation con il robot. L'exergame è stato suddiviso, quindi, in tre fasi essenziali:

- Test o Valutazione preliminare;
- Allenamento/Training;
- Retest o Post Valutazione.

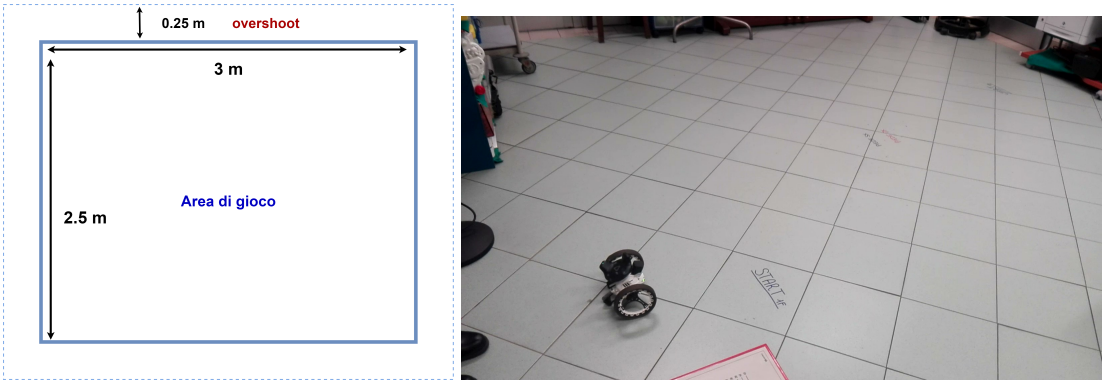

Figura 4.23: A sinistra l'area di gioco "teorica", dove le linee continue rappresentano il rettangolo di gioco in cui si muovono il robot e il giocatore, mentre, le linee tratteggiate rappresentano lo spazio di overshoot. A destra un'istantanea dell'area di gioco reale, dove sono stati disegnati per terra dei simboli che indicano le posizioni di partenza dei vari esercizi.

La fase di Test è composta da diversi punti, descritti di seguito:

- Esame audiometrico tonale, per verificare il criterio di inclusione;
- Esame audiometrico vocale, per valutare la percentuale di intelligibilità, in riferimento a 20 logotomi, con un segnale a 50dB SPL e un rumore di tipo "White Noise" a 45dB SPL (rapporto S/N +5db SPL, favorevole all'ascoltatore), tarato con voce femminile;
- Test di valutazione dell'equilibrio con la pedana stabilometrica (paragrafo 4.1.6), a occhi aperti e chiusi;
- Test per valutare la capacità di "colpire delle mire", gestendo il proprio centro di gravità (sempre mediante pedana stabilometrica);
- Test di Cesarani (paragrafo 4.1.6), per valutare l'orientamento spaziale;
- Test di Riproduzione speculare dei movimenti del robot (paragrafo 4.3.3).

La fase di Retest prevede l'esecuzione invertita degli stessi test della fase di valutazione preliminare, con una modifica del percorso speculare del robot. Per quanto riguarda l'allenamento, sono previste due tipologie di esercizi, uno di localizzazione sonora (paragrafo 4.3.5) e uno di inseguimento del robot (paragrafo 4.3.4). Questi esercizi hanno scopo di stimolare le funzionalità uditive, vestibolare, relative alla navigation: infatti è previsto che il soggetto esegua il training, bendato, in modo che non possa fare affidamento sul sistema visivo, fondamentale per orientarsi nello spazio e restare in equilibrio. Inizialmente, il protocollo prevedeva due esercizi di localizzazione e quattro di inseguimento, ad occhi chiusi, con rispettiva riproduzione su carta dei movimenti fatti dal robot, secondo uno specifico ordine illustrato di seguito:

- riproduzione motoria del primo percorso;
- riproduzione del percorso fatto su carta (ad occhi aperti);

- riproduzione del secondo percorso (bendato, senza il successivo disegno su carta);
- prima esercitazione della localizzazione sonora;
- riproduzione motoria del terzo percorso;
- seconda esercitazione della localizzazione sonora;
- riproduzione motoria del quarto percorso;
- riproduzione del percorso fatto su carta (ad occhi aperti).

Lo scopo era di mettere alla prova il giocatore su più varianti della medesima tipologia di gioco, che andassero a stimolare le sue capacità di rappresentazione spaziale e di localizzazione sonora. Il particolare, tale ordine di riproduzione serviva ad osservare se l'esecuzione prima e dopo dell'uno o dell'altro esercizio, potesse migliorare le prestazioni del giocatore negli esercizi successivi. In seguito, il training è stato alleggerito, sia per motivi di tempo (far star il giocatore troppo sotto sforzo poteva essere controproducente), sia per la ridondanza degli esercizi.

Nei paragrafi successivi verranno descritti ed analizzate le fasi di sviluppo del Test di Riproduzione speculare e degli esercizi di localizzazione e inseguimento del robot.

4.3.3 Test di Riproduzione speculare

Il Test di Riproduzione speculare prevede una valutazione della navigation, attraverso l'utilizzo del robot. Lo scopo è quello di valutare le capacità, del soggetto, di eseguire comandi motori, di rappresentazione spaziale, di crearsi mappe mentali e di memorizzare comandi nel breve termine. Il test è un "evoluzione", uno sviluppo del Test di Cesarani, che ha come obiettivo quello di migliorare diversi punti deboli del test standardizzato sulla navigation, quali: comandi facili da imparare ed assimilare, percorso (quadrato) poco complesso, nessuna possibilità di modificare o personalizzare i comandi/percorso. Inoltre, il test proposto prende spunto anche dall'esercizio, usato in ambito vestibolare, della Marcia su percorsi memorizzati (paragrafo 4.1.6), che punta, soprattutto, al potenziamento delle capacità di analisi e memorizzazione spaziale.

In sintesi, Il Test di Riproduzione speculare, prevede che il Jumping Sumo compia un percorso all'interno dello spazio di gioco, che il soggetto deve successivamente riprodurre, sia a livello motorio, che su un foglio di carta, in maniera speculare. La prova è suddivisa, quindi, in due fasi, una di esecuzione motoria, una di riproduzione su carta. Nell'esecuzione motoria il robot è posto al centro di uno dei due lati corti del rettangolo, orientato verso il lato opposto, con il giocatore posizionato dietro al robot stesso, per avere il medesimo orientamento. Questa fase a sua volta è composta da due momenti: nel primo l'utente deve stare fermo nella sua posizione e osservare (occhi aperti) il percorso prestabilito che compie il robot; nel secondo momento, invece, quando il robot ha finito di muoversi ed è arrivato nell'ultima posizione, il giocatore deve ripercorrere lo stesso tragitto del robot, ma in maniera speculare. Per speculare si intende che è necessario invertire tutti i cambi di direzione del robot, rispetto alla direzione di partenza che aveva quest'ultimo. In pratica, è come se fosse presente uno specchio che divide a metà il rettangolo di gioco, che va dal centro del lato più corto fino al lato opposto: dunque, se il robot avesse girato verso destra, il soggetto, nella fase di riproduzione motoria, dovrebbe girare verso sinistra, e viceversa (robot sinistra, segue giocatore destra). I cambi di direzione, destra-sinistra, non sono solo quelli a +/- 90°, ma anche +/- 135° e 45°. La differenza tra i due test, è che nel Test di Cesarani, il soggetto è bendato e riceve comandi di tipo vocale, mentre, nel test proposto, il soggetto riceve, visivamente, i comandi di esecuzione del percorso, dai movimenti del robot. In pratica, ad ogni tratto eseguito dal robot, insieme ai cambi direzionali, corrisponde uno specifico comando, che indica la lunghezza e la direzione del tratto da percorrere. La difficoltà maggiore, sta nel fatto che il soggetto deve poi eseguire questi "comandi" in maniera speculare.

Alla fine dell'esecuzione motoria è prevista la fase di riproduzione su carta: qui il giocatore deve disegnare su un foglio, in cui l'area di gioco è rappresentata scalata e nelle giuste proporzioni, il percorso eseguito dal robot. E' importante, dunque, che il giocatore non si confonda con il

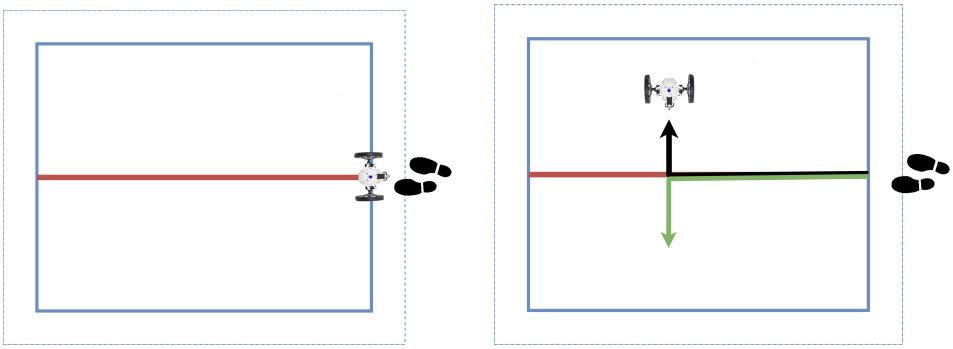

Figura 4.24: A sinistra, sono indicate le posizioni di partenza e l'orientamento del Jumping Sumo e del giocatore, che si trova nella zona di overshoot. La linea rossa indica lo specchio ipotetico che sarebbe presente nella scena. A destra, è descritto un esempio di come il giocatore deve ragionare: osservando che il robot procede dritto e gira verso destra, comprende che successivamente dovrà spostarsi in avanti e, nel punto giusto, cambiare direzione verso sinistra.

percorso che lui ha eseguito, ma deve ricreasi mentalmente gli spostamenti e i cambi direzionali del Jumping Sumo.

Per quanto riguarda i percorsi, l'idea è di valutare il soggetto in base alla sua capacità di memorizzare una serie di cambi direzionali, mantenendo lo stesso span di memoria del Test di Cesarani. Questi si dividono in un numero uguale di spostamenti verso destra e sinistra (a +/- 90°, 45°, 135°). I percorsi prestabiliti sono due: uno per la fase di valutazione preliminare e uno per il Retest. Da come si evince in Figura 4.25, i percorsi sono uno lo speculare dell'altro: in pratica alla soluzione del giocatore, nella fase di Test, corrisponde il percorso del robot nella fase di Retest, e viceversa. Questo, insieme ai cambi di direzione repentini, serve a confondere e mettere maggiormente in difficoltà il giocatore.

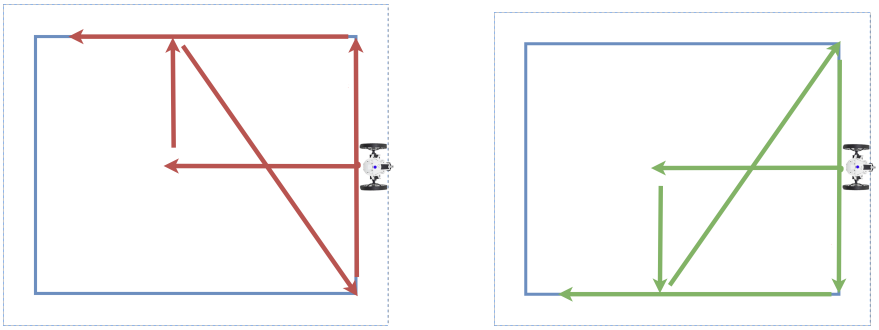

Figura 4.25: A sinistra è illustrato il percorso per la valutazione preliminare, a destra quella per la post valutazione. In entrambi i percorsi il robot compie due rotazioni a 45° e 90° sia verso destra, che sinistra.

Riprendendo il concetto dei comandi, è possibile, dunque, descrivere ad ogni movimento del robot, che tipo di comando dovrebbe recepire il giocatore, evidenziando che ogni comando indica due parametri, la lunghezza del tratto e il verso, la direzione di spostamento (cambio direzionale). In Tabella 4.2 è riportata la corrispondenza comandi robot-soggetto, per il test preliminare. Per la fase di post valutazione il ragionamento è lo stesso, ma invertito.

Per quanto riguarda gli aspetti tecnici è stato scelto di usare per i movimento del robot, il tipo di controllo dinamico (paragrafo 4.1.3), dal momento che garatisce una maggiore fluidità. Questi esercizi consentono di avere una maggiore precisione nei movimenti del robot, dal momento che deve eseguire il test a velocità moderata. Il giocatore è stato tracciato tramite il controller, posizionato sul petto: i campioni ottenuti sono stati usati, in seguito, per la fase di valutazione e analisi.

Corrispondenza Comandi		
Robot		**Soggetto**
1	Avanza di 1.5m	Avanza 1.5m
2	Ruota a destra di 90°, Avanza di 1m	Ruota a sinistra di 90°, Avanza di 1m
3	Ruota a destra di 135°, Avanza di 2.12m.	Ruota a sinistra di 135°, Avanza di 2.12m
4	Ruota a sinistra di 90°, Avanza di 2m	Ruota a destra di 90°, Avanza di 2m
5	Ruota a sinistra di 90°, Avanza di 2.5m	Ruota a destra di 90°, Avanza di 2.5m

Tabella 4.2: E' descritto come, agli spostamenti del robot, corrispondano dei comandi di movimento, che il soggetto poi traduce in modo speculare.

4.3.4 Esercizio di Inseguimento

L'idea di questo esercizio è quella di migliorare le capacità di equilibrio e orientamento spaziale. Il giocatore, infatti, deve inseguire il robot all'interno della scena, bendato, orientandosi solo grazie ad un suono emesso dal robot stesso (cassa bluetooth). I due partono dalla stessa posizione di partenza, a una distanza circa pari al passo stabilito (50 cm). Quando il Jumping Sumo emettere il suono, il giocatore riceve il comando che può incominciare ad inseguirlo, fino all'istante in cui il robot non cesserà di mandare il segnale audio. Lo scopo del giocatore, dunque, è quello di seguire il robot, percorrendo il suo stesso tragitto, mantenendosi ad una distanza minima.

I vari parametri, quali tipo di percorso, velocità del robot, segnale audio, sono stati scelti attraverso una serie di test e prove empiriche su diversi soggetti. Innanzitutto, per quanto riguarda la velocità del Jumping Sumo, è stato scelto un andamento sempre moderato, in modo da dare al giocatore la possibilità di stare al passo. Per il controllo del robot, sono state valutate entrambe le soluzioni realizzate: nonostante il controllo in serie (regolo prima la rotazione e poi la velocità) fosse più preciso, questo mostrava problemi di discontinuità e "scattosità" dei movimenti, dovuti al problema di non riuscire a scendere sotto la soglia di tolleranza angolare (paragrafo 4.1.3). Questo problema, dunque, ha comportato l'utilizzo del controllo in parallelo dei parametri di input, offrendo linearità e continuità dei movimenti. Inoltre, la fluidità di rotazione nelle curve favoriva il giocatore nel percepire il cambio di tratto del robot, perché sentiva sia le ruote girare e sia una variazione della sorgente sonora. Per quanto riguarda il percorso, il concetto è lo stesso del Test di Riproduzione speculare, ossia valutare la memoria spaziale del giocatore attraverso una serie di cambi direzionali. Inizialmente erano previsti quattro percorsi, con sei cambi direzionali, tre verso sinistra e tre verso destra. Dalla Figura 4.26 si evince, come ciascun percorso fosse abbastanza complesso, con rotazioni anche oltre i 90° per confondere l'orientamento del giocatore.

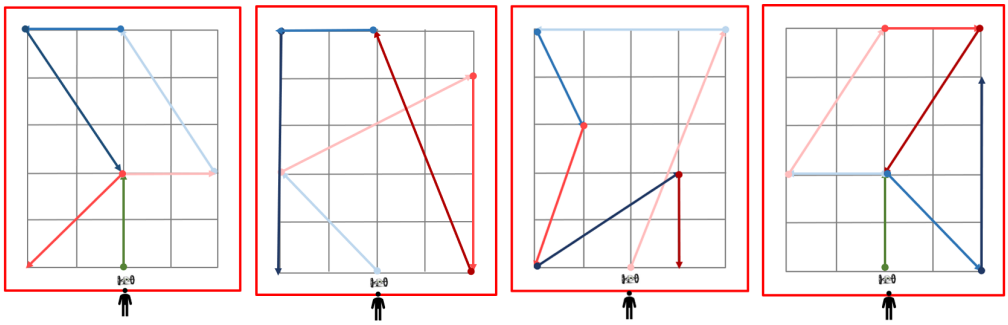

Figura 4.26: Primi percorsi ideati per l'esercizio di inseguimento.

Tuttavia, questo tipo di percorsi mostrava dei problemi in riferimento all'esecuzione motoria del giocatore, dovuti alle dimensioni limitate dell'area di gioco. Infatti, dovendosi muovere in uno spazio ristretto, mantenendo una certa distanza dal robot, il giocatore era solito non percorrere lo stesso tragitto, ma tendeva a passare da un tratto ad un altro, senza completarli. Questo fenomeno si notava soprattutto nei cambi direzionali, dove l'angolo fosse molto stretto, e nei tratti poco lungi. In aggiunta, il dover mantenere una distanza minima dal robot accentuava

questo problema: infatti, testando distanze troppo lunghe (sopra i 50 cm), si osservava come il giocatore tendeva a tagliare il percorso, passando dal punto iniziale di un tratto al punto finale del tratto successivo, mentre, con distanze più corte (sotto i 25 cm) si rischiava la sicurezza del robot e del giocatore stesso. Il problema nasceva dal fatto che, il giocatore, generalmente, necessitava di un certo lasso di tempo per ricalcolare l'orientamento e la posizione del robot nella scena, dopo un cambio direzionale. Con angoli stretti la difficoltà di ricalcolare la posizione era certamente maggiore, tant'è vero che nell'istante in cui il giocatore riprendeva a camminare, il robot era già almeno alla metà del tratto successivo, e questo induceva il soggetto stesso a tagliare la curva. Dunque, una soluzione sarebbe stata avere curve meno strette, al di sopra dei 90°, e tratti almeno lunghi quanto la distanza minima, in modo che il giocatore avesse il tempo di seguire il robot e non fermarsi per ricalcolare la posizione di quest'ultimo. Purtroppo, lavorando in uno spazio limitato, questa soluzione non è stata realizzabile, tuttavia, sono state apportate delle modifiche ai percorsi che hanno migliorato l'esecuzione motoria dell'esercizio.

L'idea è stata quella di eliminare le curve al di sotto dei 90° e ad avere tratti di spostamento abbastanza lunghi, senza perdere l'obiettivo dell'esercizio. Per questo motivo è stato definito un solo percorso finale, a forma di otto. Tale forma ha permesso di ridurre sia i problemi di inseguimento e sia la ridondanza dei percorsi ideati. A partire dall'otto, sono stati stabili due modalità di inseguimento, in senso orario e antiorario, per allenare la percezione uditiva e vestibolare, per entrambe le polarità (orecchie). Inizialmente, il robot partiva al centro della scena per disegnare la forma ad otto, però questa modalità non sfruttava ognuno dei lati a disposizione dell'area di gioco e la rispettiva lunghezza. Pertanto, in seguito, è stato definito un punto di partenza diverso, che fosse ad uno dei vertici del rettangolo di gioco, in modo da utilizzare al meglio lo spazio a disposizione (Figura 4.27). Inoltre, è stata stabilita una distanza minima di circa 25-30 cm, in modo che il giocatore potesse seguire al meglio il tragitto del robot, senza rischiare di colpirlo. Infine, per avvertire il soggetto di essersi avvicinato troppo al Jumping Sumo, è stato utilizzato il controller: infatti questo, posto sul petto del giocatore, per tracciarne la posizione, è stato utilizzato anche per inviare un feedback aptico, una vibrazione nel momento in cui la distanza tra i due fosse al di sotto della soglia stabilita.

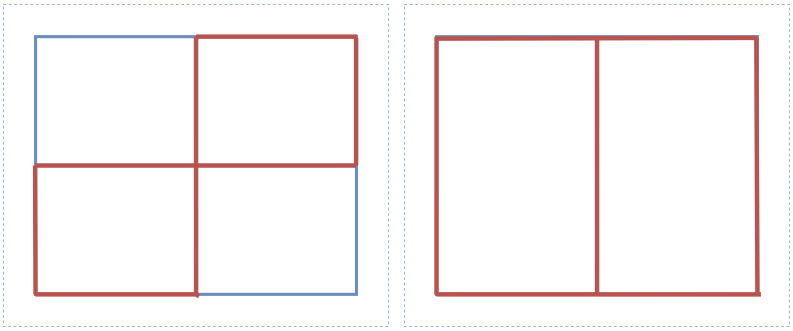

Figura 4.27: A sinistra è illustrato la prima idea di percorso ad otto, che non sfruttava al meglio lo spazio dell'area di gioco. A destra, invece, è mostrato il percorso finale nell'esercizio di inseguimento.

Per quanto riguarda il segnale audio, c'era bisogno di stabile tre parametri, il tipo di suono, la frequenza del segnale e i BPM (battiti per minuto). Lo scopo era di ottenere un segnale, che potesse confondere maggiormente l'orientamento del giocatore sano, dal momento che quest'ultimo già riceva "aiuti" dal rumore delle ruote del Jumping Sumo. Per le caratteristiche del segnale è stato preso spunto dall'avvisatore acustico per ipovedenti, applicato agli incroci semaforici [66]. Questo prevede un trillo con una frequenza sonora di 800 Hz,che va dai 60 ai 120 BPM, in base al colore del semaforo. Da questi dati, sono stati testati diversi valori del segnale audio, per scegliere quello che maggiormente confondesse il giocatore. Per il tipo di suono è stato scelto un "bip", mentre per frequenza l'intervallo è rimasto tra gli 800-1000 Hz, senza andare oltre i 1500 Hz, sottolineando che la testa riflette le alte frequenze a differenza delle basse, che girano intorno a quest'ultima, arrivando all'orecchio più lontano dalla sorgente sonora (paragrafo 4.1.6). Per quanto riguarda i battiti al minuto, è stato constatato che, con valori bassi (60 BPM) il soggetto riceveva il segnale audio con una cadenza che non gli consentiva di star al

passo con il robot, d'altra parte, con frequenze di battito troppo elevate (100 BPM), il soggetto andava in maggiore difficoltà, perché il segnale diventava troppo continuo e non più impulsivo. Tutto ciò, quindi, non creava nel giocatore uno stato confusionale, ma un fastidio doloroso, da evitare. Infine, è stato scelto un valore pari a 80 BPM, dal momento che risultava il migliore per gli scopi stabiliti.

E' fondamentale evidenziare, che per questi tipi di esercizi, la stanza sia libera da rumori di sottofondo, che potrebbero confondere la percezione uditiva del segnale acustico ed invalidare il test. In Figura 4.28 sono mostrati alcuni dei vari esperimenti fatti su uno stesso soggetto. Dalle immagini si evince che è stato usato il percorso ad otto, però ancora con una partenza dal centro. Questi grafici descrivono i tracciati del giocatore (colore blu) e del robot (colore verde), ottenuti dai campioni acquisiti tramite il controller (posto sul petto) e il Vive Tracker. A sinistra, si osserva come il giocatore abbia tracciato un percorso confusionale, dovuto all'elevato valore dei BPM, pari a 100. Al centro, è stato sovrapposto il percorso del robot con quello del giocatore, con una distanza minima di 60 cm: si osserva come il giocatore taglia le curve alla metà di ogni tratto. A destra, infine, è stata testata un distanza minima inferiore (30 cm), con audio a 80 BPM: si denota come i tracciati del robot e del giocatore si sovrappongono maggiormente.

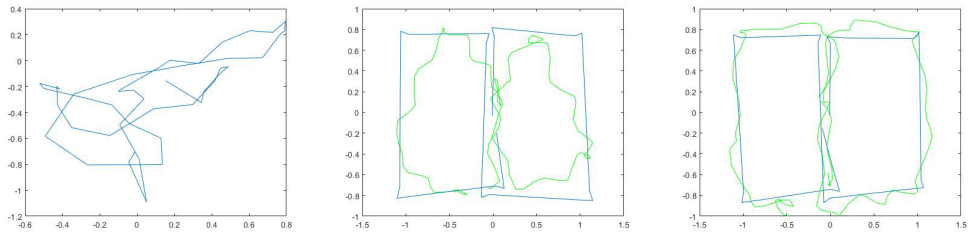

Figura 4.28: A sinistra, si osserva il tracciato del giocatore con segnale audio a 100 BPM; al centro tracciati sovrapposti giocatore (verde) e robot (blu), con distanza minima sui 60 cm; a destra tracciati sovrapposti con distanza sui 30 cm, con audio a 80 BPM.

Infine nell'esercizio era prevista anche una riproduzione su carta del percorso fatto dal robot, per allenare la rappresentazione spaziale del giocatore. Questa fase è stata successivamente eliminata per non affaticare troppo il soggetto testato e poiché non è risultata rilevante ai fine del training.

4.3.5 Esercizio di Localizzazione

Questo esercizio ha scopo di stimolare le capacità di localizzazione sonora del soggetto, analogamente a come si fa nei test per la valutazione della capacità di discriminazione percettiva in termini di direzionalità sonora. La localizzazione sonora sul piano verticale dell'orecchio umano si basa essenzialmente sulla conformità del padiglione auricolare. Considerando coma angolo zero la direzione verso cui osserva una persona, è possibile affermare che il sistema uditivo è molto bravo a percepire sorgenti sonore a +/- 45°, meno bravo per suoni +/- 90° (massima ITD), è messo in confusione da suoni provenienti a 0° e 180° (minima differenza interaurale), diventa pessima per i restanti angoli. Inoltre, i suoni ad alte frequenze (maggiori di 1.5k Hz) sono più facili da localizzare poiché la testa li riflette, mentre le basse frequenze rendono più difficile la localizzazione per il fenomeno della diffrazione.

L'esercizio è stato pensato nel seguente modo: il giocatore posto al centro della stanza, bendato, ha come obiettivo quello di localizzare il Jumping Sumo, attraverso un suono che emette dopo un certo lasso di tempo. Nel dettaglio, il robot gira intorno al giocatore, posizionandosi in particolari punti della scena, e una volta fermatosi, invia un preciso segnale audio, dopo aver atteso una certa pausa temporale. Nel compiere dei giri all'interno del rettangolo di gioco, il Jumping Sumo descrive una circonferenza di un certo raggio, avente come angolo zero di riferimento la direzione di osservazione del giocatore bendato (Figura 4.29). I punti in cui il robot va a fermarsi sono tutti multipli di 45° e le pause previste, possono durare in maniera casuale tra 1-5 secondi. Per quanto riguarda il raggio, è stato scelto, per motivi di spazio, la metà della lunghezza (1 m) del lato più corto. In aggiunta, per ogni angolo sono stati previsti tre diversi tipi

di segnali audio, che variano in base alla frequenza, la quale raddoppia (ottava superiore) circa tra una frequenza e quella successiva. Sono stati scelti, dunque, suoni a bassa (800 Hz), media (1500 Hz) e alta frequenza (3000 Hz). I segnali audio consistono in due "bip", molto ravvicinati, e non vengono ripetuti in serie, ogni qual volta che il robot si ferma in un angolo preciso. In sintesi, sono previsti 8 angoli ($angolo = k \cdot 45$, con k che va da 0 a 7), tre segnali audio per ciascuno di essi, con un totale di 24 posizioni, in cui deve fermarsi il robot.

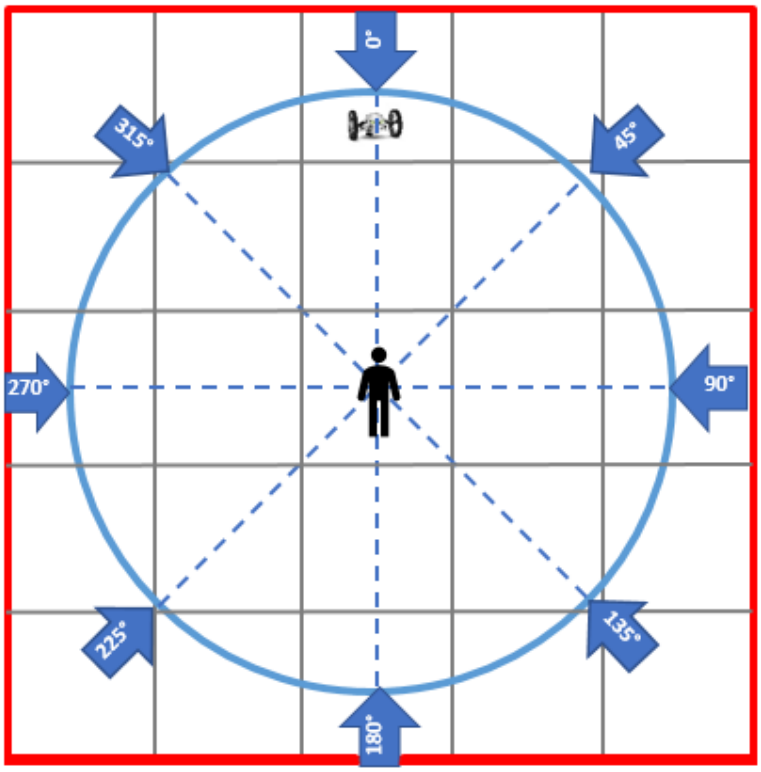

Figura 4.29: Circonferenza di raggio 1 m, tracciata dal robot, nel girare intorno al giocatore posto al centro della scena. Gli angoli rappresentano i punti dove il robot si ferma per inviare il segnale audio.

Per quanto riguarda l'ordine di percorrenza dei punti, è stato stabilito che il robot dovesse girare sempre in un solo senso (orario o antiorario) e che due punti consecutivi fossero ad una differenza angolare tra i 120-180 gradi. Quindi, il robot non ha la possibilità andare su un angolo troppo vicino, ma è vincolato a compiere un semi cerchio intorno al giocatore per confonderlo. Inizialmente, erano state definite due tabelle (4.3) di posizioni angolari, una in senso orario, l'altra in senso antiorario, per stimolare entrambe le polarità dell'orecchio. Tuttavia, i due esercizi tendevano a durare circa un 15 minuti in totale, e quindi, per non allungare i tempi del protocollo e affaticare eccessivamente il giocatore, è stato scelto di ridurre l'esercizio ad una sola tabella, in cui una metà dei punti vengono percorsi in senso orario ed un'altra in senso antiorario.

Posizione	Grave (800 Hz)	Medio (1500 Hz)	Acuto (3000 Hz)
0°	8	10	16
45°	5	12	3
90°	18	22	14
135°	7	1	11
180°	21	24	19
225°	13	20	6
270°	23	9	4
315°	2	15	17

Posizione	Grave (800 Hz)	Medio (1500 Hz)	Acuto (3000 Hz)
0°	20	6	4
45°	2	24	14
90°	16	10	18
135°	5	19	7
180°	8	13	11
225°	12	3	22
270°	9	21	1
315°	23	15	17

Tabella 4.3: In ciascuna tabella, per ogni angolo sono presenti tre numeri: questi indicano l'ordine in cui deve fermarsi il robot in quella posizione e quale dei tre segnali audio eseguire.

Per la localizzazione sonora, è stato deciso che il giocatore usasse il controller come puntatore.

Nelle prime ipotesi si riteneva opportuno che il soggetto, tenendo il dispositivo in mano, puntasse verso il robot, dopo che questi avesse inviato il segnale audio, e premesse il pulsante di "trigger" per confermare la scelta. In pratica, nella scena 3D, in Unity, si faceva partire un raggio dalla "testa" del controller e si verificava che questo andasse a collidere con il pavimento virtuale. In tal caso, si prendevano le coordinate globali del punto di intersezione, e se la differenza (l'errore), tra quest'ultimo e la posizione del Jumping Sumo, rientrava in un certo range, la localizzazione risultava positiva. Negli altri casi, se il giocatore puntava fuori dalla scena o lontano dal robot, la localizzazione risultava negativa e si inviava un feedback aptico, una vibrazione al controller. Questa soluzione è stata ben presto scartata per tre motivi: innanzitutto era importante non tanto la posizione della sorgente sonora, ma l'angolo di quest'ultima; in secondo luogo, questo sistema di puntamento era affetto da un errore di parallasse, che si riscontrava dal momento che, nell'usare un dispositivo come prolungamento della mano, in particolare del dito, si creava una differenza, tra la direzione puntata dal braccio/spalla e quella del controller, che andava, dunque, ad inficiare l'effettiva la direzione puntata dal soggetto; infine, il terzo problema era che il giocatore trovava difficoltoso puntare il Jumping Sumo, quando questo si fermava in posizioni "scomode" (180°, dietro al giocatore). In questi casi, accadeva che il soggetto girava il busto o tutto il corpo per puntare, ritornando poi alla posizione iniziale, rivolto verso l'angolo zero. Tuttavia, dal momento che il giocatore era bendato, non sempre riusciva nel riposizionarsi correttamente e ciò avrebbe potuto provocare, dunque, una modifica, una variazione della propria rappresentazione spaziale, delle coordinate angolari e della percezione dell'orientamento. Tutti questi problemi avrebbero potuto condurre ad una scorretta esecuzione dell'esercizio. Una seconda versione per la localizzazione sonora prevedeva che il giocatore ruotasse il braccio verso l'angolo in cui ritenesse che il robot fosse posizionato. In questo caso, il controller andava tenuto orizzontalmente sulla mano e per confermare la scelta si doveva premere sempre il pulsante di trigger. Per ottenere l'angolo di puntamento, si prendevano le coordinate del controller sul piano xz (pavimento) e si calcolava l'arcotangente: se la differenza, dell'angolo ottenuto e l'angolo effettivo del robot, era al di sotto di una certa soglia la localizzazione risultava positiva. L'errore massimo consentito era stato stabilito sui 20-23 gradi, pari alla metà dell'angolo compreso tra due posizioni adiacenti. Purtroppo, questa metodologia presentava in parte gli stessi errori della prima (parallasse e rotazione del corpo), ed in più era affetta da un ulteriore difetto: infatti, era doveroso che il giocatore tenesse il controller orizzontale, parallelo al pavimento, altrimenti l'angolo puntato sarebbe potuto risultare differente. Tutto ciò ha condotto, infine, ad adoperare una soluzione più "stabile": per risolvere i problemi delle prime metodologie, il controller è stato posto capovolto sopra un tavolino, collocato davanti al giocatore. In pratica, questo tipo di appoggio assicurava che il dispositivo fosse sempre in posizione orizzontale. Inoltre, per puntare l'angolo, in cui era posizionato il robot, il giocatore non doveva più muovere il controller, ruotando braccio, busto e corpo, ma gli bastava girarlo, sopra il tavolino, direzionandolo come l'ago di una bussola. In sintesi, se il Jumping Sumo andava a posizionarsi in un certo angolo alfa della circonferenza, al giocatore bastava girare di un angolo alfa il controller e premere il pulsante di trigger, per confermare la scelta (Figura 4.30). L'angolo zero di riferimento del controller era lo stesso di quello del giocatore.

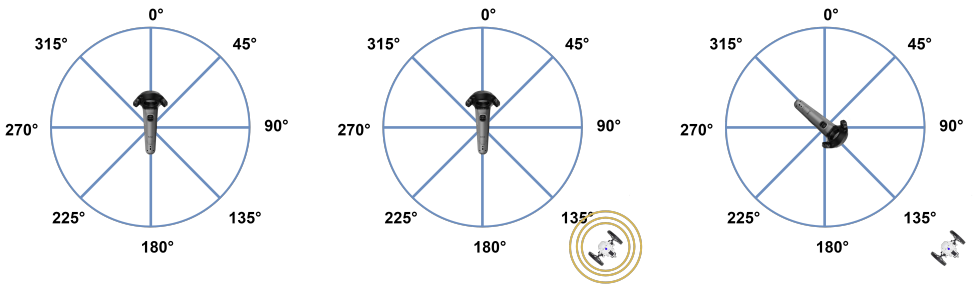

Figura 4.30: Nelle immagini è illustrata la metodologia "bussola" del controller nella localizzazione sonora. All'inizio (sinistra) il controller si trova nella posizione di riferimento (angolo zero). In seguito (centro), il robot emette un suono dalla posizione angolare di 135° e il giocatore ruota, quindi, il controller (destra) in modo tale che punti allo stesso angolo del robot.

Infine per quanto riguarda i movimenti del robot, è stato deciso di usare sempre il controllo dinamico, con velocità variabile, per poter creare maggiore confusione nella percezione del soggetto, dal momento che le ruote del robot avrebbero potuto aiutarlo nella localizzazione sonora.

Capitolo 5

Sperimentazione

In questo capitolo verrà illustrata la fase di sperimentazione del lavoro di tesi, analizzando i risultati del test.

5.1 Introduzione

5.1.1 Protocollo definitivo

In questo paragrafo è descritto im modo conciso la versione definitiva del protocollo, applicata nella sperimentazione.

Criteri di inclusione
20 Soggetti tra i 20-35 anni, normoacustici (PTA $<$ 20-25 dB HL).

Area di gioco
Rettangolo di dimensioni uguali a 2.5×2.0 metri, con una cornice intorno a ciascun lato pari a 25 cm. Ogni posizione nello spazio di gioco è individuato attraverso una vettore xz, con valori compresi rispettivamente nell'intervallo, $[-1.25; 1.25]$ per l'asse x e $[-1.0; 1.0]$ per l'asse z;

Tempo
Circa 40 minuti a soggetto.

Fase di Test

Esame	**Descrizione**	**Indice**
Audiometria		
Tonale	Valutazione della soglia di udibilità di un soggetto per il criterio di inclusione	Pure Tone Average (PTA)
Vocale	Valutazione dell'intelligibilità di un soggetto in riferimento a 20 logotomi. Segnale a 50dB SPL, Rumore "White Noise" a 45dB SPL. Rapporto S/N +5db SPL.	Numero di logotomi indovinati.
Stabilometria: pedana		
Immagini stabilizzanti	Valutazione del controllo posturale (baricentro) del soggetto, ad occhi aperti (OA) e chiusi (OC)	Superficie dell'ellisse e Lunghezza della traccia
Mire visive	Valutazione della capacità del soggetto nel colpire delle mire spostando il suo baricentro.	Numero di centri e tempo.
Navigation: esecuzione motoria e riproduzione su carta		
Test di Cesarani	Valutazione capacità spaziali, di orientamento e memoria a breve termine del soggetto.	Punteggio e tempo
Test di Riproduzione speculare	Valutazione capacità spaziali, di orientamento e memoria a breve termine del soggetto con il robot	Punteggio e tempo

Tabella 5.1

Allenamento/Training con il Jumping Sumo

Premesse: l'allenamento è stato svolto in condizioni di deprivazione visiva, in modo che il soggetto facesse uso solo del sistema uditivo e della memoria spaziale per orientarsi nella scena, dal momento che la navigation è data appunto dalla collaborazione del sistema visivo e da quello vestibolare.

- **Esercizio di Localizzazione Sonora**
  - *Scopo*: migliorare le capacità di localizzazione del giocatore, attraverso una sorgente sonora dinamica (Jumping Sumo).
  - *Descrizione*: il giocatore, posto al centro della stanza, bendato, deve usare il controller come una "bussola" per localizzare l'angolo in cui il robot si è fermato. Questo, gira intorno al giocatore, per una metà dei punti in senso orario e una in senso antiorario, in modo da stimolare entrambe le polarità uditive. Ogni volta che si colloca in una posizione specifica, emette un segnale audio (cassa bluetooth) a una certa frequenza, dopo una pausa variabile tra 1-5 secondi. Se il giocatore non indovina l'angolo riceve un feddback aptico, vibrazione dal controller.
  - *Segnale Audio*: "bip" a 800, 1500, 3000 Hz.
  - *Posizioni Angolari*: 8 angoli a $k \cdot 45$, con $k = 1...7$, a distanza (raggio) 1 metro.
  - *Numero Posizioni*: 3 segnali audio $\cdot$ 8 angoli, 24 posizioni.
  - *Errore di tolleranza*: 20-22 gradi, circa la metà della distanza angolare minima tra due punti consecutivi.

Tabella: ordine di esecuzione			
Posizione	**Grave (800 Hz)**	**Medio (1500 Hz)**	**Acuto (3000 Hz)**
0°	13	23	6
45°	21	8	15
90°	11	19	3
135°	1	17	24
180°	14	5	9
225°	7	12	22
270°	20	2	16
315°	4	10	18

Tabella 5.2: Tabella definitiva: per ogni angolo sono presenti tre numeri, che indicano l'ordine in cui deve fermarsi il robot in quella posizione e quale dei tre segnali audio eseguire.

- **Esercizio di Inseguimento**
  - *Scopo*: migliorare le capacità vestibolari, relative alla navigation, e uditive del giocatore, attraverso un inseguimento, moderato, della sorgente sonora (Jumping Sumo).
  - *Descrizione*: il giocatore, bendato, deve seguire il robot, ascoltando un segnale audio, emesso dalla cassa bluetooth, cercando di mantenere sempre una certa distanza dal robot stesso. Se il soggetto si avvicina troppo al robot (sotto la minima distanza), per motivi di sicurezza, il controller, posto sul petto del giocatore, vibra.
  - *Percorsi*: due percorsi a forma di otto, uno in senso orario e uno in senso antiorario.
  - *Segnale Audio*: "bip" a 1000 Hz, 80 BPM.
  - *Distanza minima*: 25-30 cm.

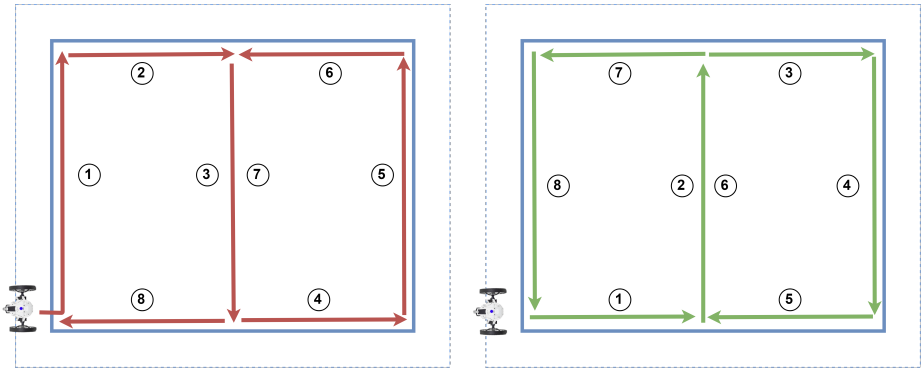

Figura 5.1: Esercizio Inseguimento: a sinistra è mostrato il percorso orario, a destra quello antiorario. I numeri indicano l'ordine di percorrenza dei tratti.

Retest
La fase di post valutazione, prevede l'esecuzione invertita degli stessi esami della fase Test, con l'unica differenza nel percorso del Test di Riproduzione speculare con il robot.

5.1.2 Indici

Gli indici adoperati sono quelli relativi al funzionamento del sistema della navigation, ovvero quelli relativi al sistema uditivo e vestibolare. Questi indici altro non sono che quei test, esami di routine, usati in ambito audiologico, per valutare le suddette funzionalità. Non è detto che

ciascuno di questi parametri debba migliorare con l'allenamento: infatti, sono stati scelti per poter valutare il protocollo sotto il maggior numero di aspetti relativi al sistema uditivo e vestibolare. Una parte degli indici è servita, dunque, per la valutazione dell'allenamento e un'altra per confrontare i test, nell'ambito della navigation. La PTA è solo un parametro per valutare la soglia uditiva di un soggetto ed è stata utilizzata prettamente come criterio di inclusione dei campioni (sani). Gli indici, utilizzati nella fase di Test e Retest, sono i seguenti:

- Logotomi;
- Superficie Ellisse;
- Lunghezza della Traccia;
- Numero e tempo centri;

L'indice dei logotomi identifica il numero di parole bisillabiche senza senso, indovinate dal soggetto, ovvero la capacità di discriminare le parole in mezzo ad un rumore di competizione (intelligibilità). La superficie dell'ellisse esprime la precisione posturale di una persona in mm^2, ossia quanto riesce a mantenere fermo il suo baricentro in una posizione statica. La lunghezza della traccia valuta l'energia spesa dal soggetto, per restare in una posizione di equilibrio. Il numero di centri serve a valutare le strategie e il controllo del centro di pressione di un soggetto, in un intervallo temporale.

I restanti indici sono stati adoperati per confrontare il Test di Cesarani con il metodo di valutazione della navigation, proposto in questo lavoro. Questi indici riportano il punteggio ottenuto e il tempo impiegato, rispettivamente per la fase di esecuzione motoria e di riproduzione su carta. Per quanto riguarda il sistema di assegnazione del punteggio, questo è descritto in Tabella 4.1 per il Cesarani, mentre, per il Test di Riproduzione speculare con il robot, è stato ideato un differente metodo di valutazione. Il metodo, in sintesi, va ad analizzare il tracciato del giocatore, confrontandolo con quello del robot: nell'esecuzione motoria, questo corrisponde ai campioni di posizione ottenuti dal controller (usato come tracker) "plottati" su un grafico cartesiano; mentre, nella riproduzione su carta, corrisponde al disegno del percorso del robot, fatto dal giocatore stesso (Figura 5.2).

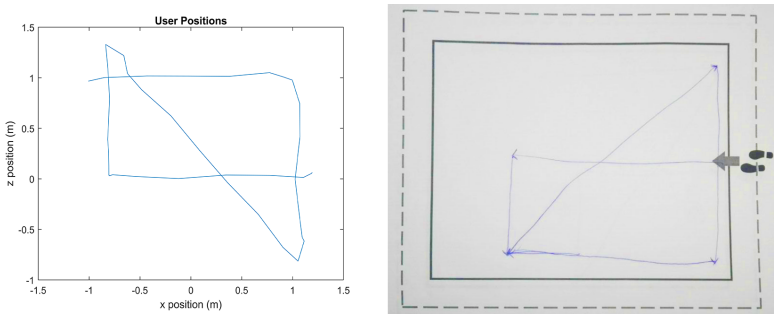

Figura 5.2: A sinistra è illustrato un tracciato delle posizioni del giocatore, mentre, a destra, una riproduzione su carta del percorso fatto dal robot.

I tracciati, a loro volta, vengono suddivisi in tratti, che dovrebbero rappresentare i comandi da eseguire, descritti nella Tabella 4.2. Dunque, a questo punto, la valutazione viene fatta, andando a verificare se i tratti del giocatore corrispondono, in sequenza, con i parametri di lunghezza e direzione richiesti nella tabella. Facendo un esempio, dal momento che il primo comando del giocatore è "avanza di 1.5 m", ci si aspetta un tratto che vada almeno per quella direzione. E' doveroso ricordare che nell'esecuzione motoria i comandi sono quelli del giocatore, mentre, nella riproduzione su carta, corrispondono a quelli del robot. Oltre alla lunghezza e alla direzione, è stato considerato anche il caso in cui un giocatore non abbia percorso alcun tratto, o abbia fatto dei movimenti eccessivi. Per definire il cambio di direzione, tra un tratto e quello successivo, non si considerano le piccole oscillazioni della traccia del soggetto, ma i punti in cui si delineano effettivi cambi direzionali: infatti, è stato osservato come il giocatore tendeva ad muovere il

corpo, orientare la testa, per meglio crearsi una sua rappresentazione spaziale ed riportare alla memoria i movimenti del robot. In sintesi, i parametri, utilizzati per la valutazione del test speculare, sono i seguenti:

- direzione e verso del tratto;
- lunghezza;
- assenza di uno specifico tratto;
- presenza di un tratto inesistente.

Il parametro di direzionalità verifica se l'i-esimo comando abbia la stessa direzione e verso dell'i-esimo tratto: infatti, può succedere che un giocatore si muova nella giusta direzione, ma nel verso sbagliato (esempio, il comando dice di girare a destra, ma il giocatore gira a sinistra). Nel dettaglio, vengono considerate quattro tipi di direzioni e verso: avanti, destra, sinistra e obliquo. Per destra e sinistra si intendono i cambi di direzione a +/- 90°, mentre, per obliquo, quelli a +/- 45° o 135°. Per ciascun tratto/comando, si assegnano 3 punti, suddivisi in 2 punti per la direzione e verso, e 1 punto per la lunghezza, poiché è più rilevante che il soggetto ricordi l'orientamento del robot che l'effettiva lunghezza percorsa. Per la direzione e il verso, a sua volta, è necessario considerare il caso particolare dello spostamento in obliquo: se il vettore tracciato dal soggetto è corretto, ossia va nella giusta direzione e verso, ma non supera l'asse centrale dell'area di gioco (dove è posizionato lo specchio virtuale) viene assegnato solo 1 punto, mentre, in caso contrario, si aggiudica i 2 punti (Figura 5.3).

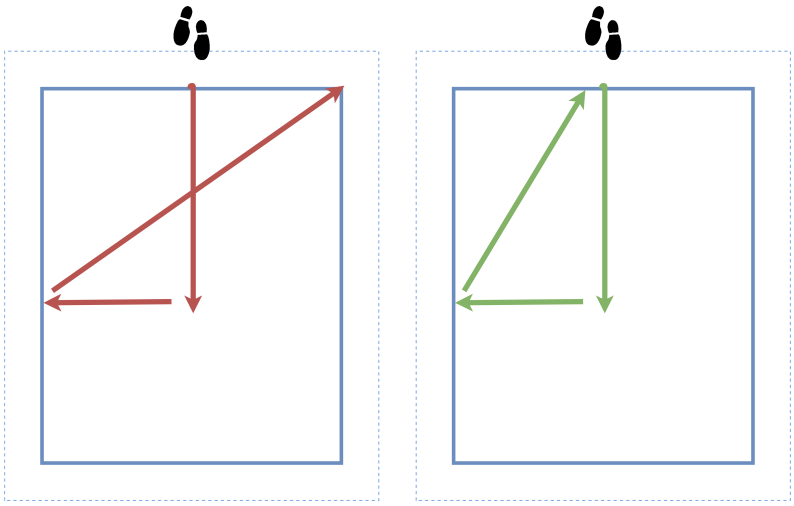

Figura 5.3: A sinistra, è illustrato come un giocatore dovrebbe riprodurre il percorso del test, in particolare, il vettore obliquo. A destra, invece, è mostrato, quando si considera non completo lo spostamento in obliquo, dal momento che il vettore non supera l'asse centrale dell'area di gioco.

Per la lunghezza si osserva se i vettori tracciati siano tra di loro proporzionali: non è rilevante che il tracciato sia scalato quanto la stanza, ma che i singoli tratti tra di loro siano nelle giuste proporzioni. Un caso particolare di valutazione è quello del primo e ultimo comando di avanzamento: si considera giusto l'ultimo tratto, se questo è lungo almeno quanto il primo, poiché, se fosse più corto, vorrebbe indicare che il soggetto non avrebbe rappresentato le giuste proporzioni tra i due vettori (Figura 5.4).

Il parametro di assenza di un tratto indica se il soggetto nella riproduzione, sia motoria che su carta, abbia mancato un vettore/comando: in tal caso, si sottraggono tre punti, dal momento che il giocatore non ha riportato, nella sua rappresentazione spaziale, due parametri fondamentali (direzione e lunghezza). D'altra parte, nell'eventuale presenza di un tratto in più nel tracciato, si sottrae solo un punto, poiché questo non preclude il fatto che il soggetto abbia ben rappresentato il resto dei tratti. In sintesi, sono stati riportati i punteggi per ogni tratto/comando in Tabella 5.3.

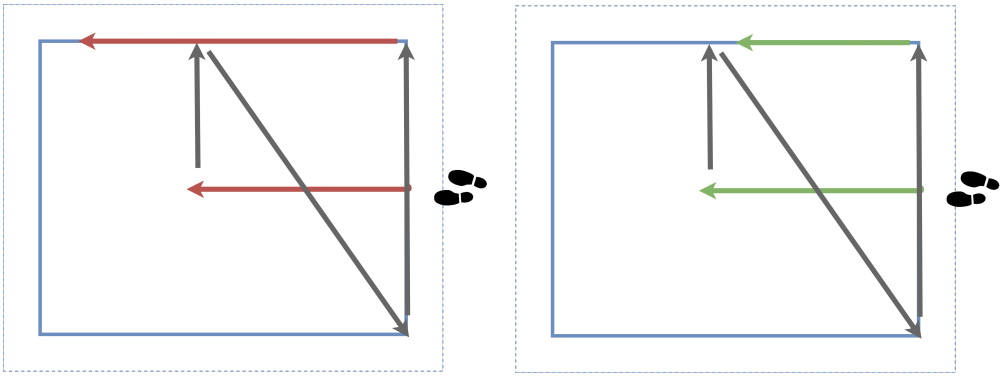

Figura 5.4: A sinistra è illustrato come un giocatore dovrebbe riprodurre le lunghezze dei vettori del percorso, in particolare, il primo e ultimo tratto. A destra, invece, è mostrato, quando si considera sbagliata la proporzione dell'ultimo vettore con il primo.

Test Riproduzione speculare: indici valutazione		
Parametri		**Punteggio**
Direzione e verso	Avanti	2
	Destra	
	Sinistra	
	Obliquo	1 + 1 (se il vettore supera asse centrale)
Lunghezza		1
Tratto in più		-1
Tratto mancante		-3

Tabella 5.3

Per maggiore chiarezza, vengono riportati degli esempi di valutazione dei tracciati in Figura 5.5. In questo specifico caso, sono state analizzate quattro esecuzioni motorie, ma lo stesso ragionamento viene fatto per la riproduzione su carta. Nel primo esempio, al soggetto sono stati assegnati il massimo dei punti (15), dal momento che è riuscito a tracciare lo stesso percorso del robot in modo speculare, rispettando direzioni e proporzionalità tra i diversi tratti (da notare come il tratto finale sia più lungo di quello iniziale). D'altra parte, per il soggetto, nel secondo esempio, è stato sottratto un punto agli ultimi tratti, poiché la lunghezza non è proporzionata al resto del tracciato, sebbene le direzioni e i versi siano giusti. Inoltre, si evidenzia che in un cambio di direzione (cerchio rosso), il tratto appaia "raggomitolato": questo è un chiaro esempio di quando un soggetto muove il busto per ragionare sul percorso da fare e il proprio orientamento spaziale. Nel terzo esempio, sono stati sottratti tre punti al tracciato, dal momento che un comando non è stato eseguito. Nonostante l'ultimo tratto non corrisponda a quello del robot, è stato dato il massimo dei punti (3), dal momento che rispetta il comando corrispondente ("avanza di 2.5 m"). Dunque, anche se un tratto viene saltato, questo non implica una valutazione negativa dei restanti comandi. Nel quarto esempio, invece, il giocatore, in due tratti ha sbagliato la direzione e il verso, ma ha percorso la giusta lunghezza del vettore, aggiudicandosi, quindi, un solo punto. Al contrario, nel penultimo tratto, il vettore era direzionato correttamente, ma la lunghezza era insufficiente.

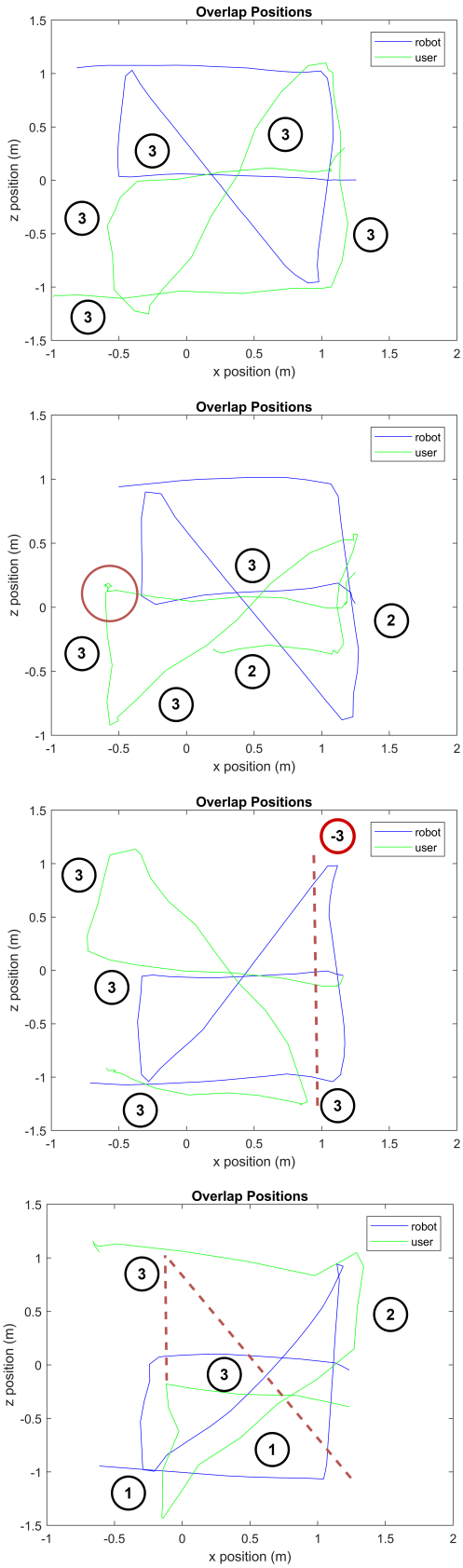

Figura 5.5: Esempi di come sono stati valutati i test di riproduzione speculare.

5.1.3 Campione di soggetti

Come già accennato, essendo l'allenamento un qualcosa di ex-novo, non esistono in letteratura delle metodologie normate, per poter fare dei confronti. Per questo motivo, oltre ai 20 campioni da testare, sono stati selezionati altri 20 soggetti, con i medesimi parametri di inclusione (PTA, età). Questo campione, però, non ha eseguito l'allenamento con il robot, ma solo le fasi di valutazione (Test e Rest), per avere un riferimento, con cui confrontarsi. Questi soggetti sono serviti per disambiguare l'eventuale effetto di miglioramento dovuto all'allenamento intrinseco delle fasi di Test e Retest. In sintesi, sono stati valutati due gruppi di campioni:

- Campione di Studio (Gruppo1), quello che ha eseguito tutto il protocollo (allenamento e test di navigation);
- Campione di Controllo (Gruppo2), quello che ha eseguito le fasi di valutazione degli indici.

5.2 Risultati sperimentazione

In questo paragrafo verranno mostrati e analizzati i risultati della sperimentazione. In primo luogo, verranno riportati i grafici e le tabelle di quanto ottenuto dall'allenamento del campione di studio e dalla valutazione del gruppo di controllo, mettendoli a confronto. In seguito, si illustreranno i dati riguardo al Test di Riproduzione speculare, eseguito solo dal campione di studio, confrontandolo con il Test di Cesarani. Infine, verranno riportate le analisi e le considerazioni relative alla variazione degli indici del campione di soggetti.

Nei paragrafi successivi, per indicare il campione di studio e quello di controllo si farà uso, anche, dei termini Gruppo1 e Gruppo2. Per le fasi di Test e Retest, verrà adottata anche la dicitura di valutazione "pre" e "post".

5.2.1 Risultati allenamento

Campione di Studio
In prima analisi, sono stati inseriti i valori degli indici all'interno di grafici, per avere una panoramica dei risultati. I grafici sono stati suddivisi in base al tipo di esame e sono stati messi a confronto i valori di pre e post allenamento. Ciascun indice non riporta il risultato di ogni soggetto, ma la loro media. Per l'audiometria vocale, l'indice dei logotomi, è quello che ha evidenziato, come prima impressione, un risultato interessante, dal momento che l'intelligibilità media dei campioni è aumentata notevolmente dopo l'allenamento. Infatti, i soggetti sono passati dall'indovinare il 26% dei logotomi, fino al 49%, nella fase di Retest, con una differenza del 23% (Figura 5.6).

Per quanto riguarda la stabilometria, in Figura 5.7 sono stati riportati i valori della superficie dell'ellisse, in mm^2, e della lunghezza della traccia, in mm, ad occhi aperti (OA) ed occhi chiusi (OC). Si denota un generale aumento degli indici, ovvero i soggetti hanno avuto una minore precisione nello stare in equilibrio sulla pedana e hanno speso più energie cognitive per controllare la postura. Per quanto riguarda il test delle mire non è stato riportato alcun indice, dal momento che non ci sono state differenze significative tra il pre e il post allenamento.

Nel passo successivo, è stato necessario valutare la significatività dei dati. Per significatività si intende che i risultati ottenuti dall'allenamento non siano frutto della causalità, ma possiedano una certa probabilità che esista una relazione di tipo causa-effetto. Per valutare i dati, quindi, è stato fato uso del **Test del T-Student**, il quale serve a verificare se la media di una distribuzione si discosta significativamente da un valore di riferimento. Per ciascun indice è stato eseguito un test T accoppiato, a due code, con un livello di significatività del 95%. In pratica, è stato verificato se la differenza delle medie, delle distribuzioni di pre e post allenamento, abbia

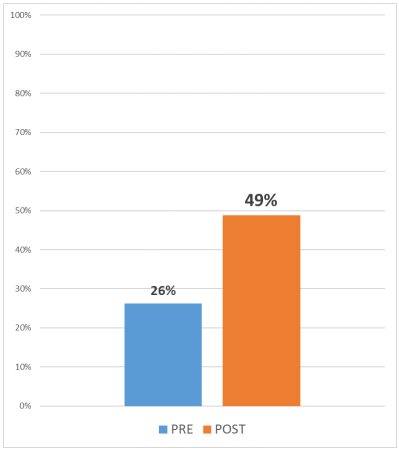

Figura 5.6: Campione di Studio - Grafico Logotomi

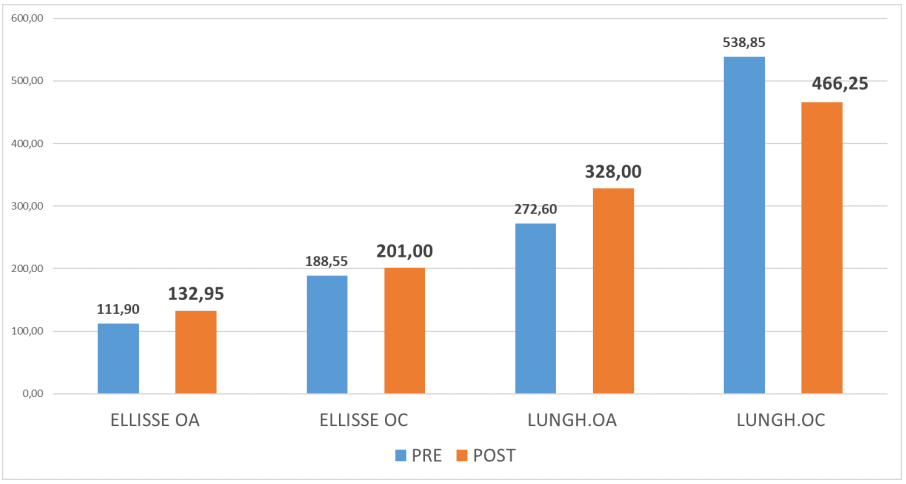

Figura 5.7: Campione di Studio - Grafico Stabilometria

avuto una probabilità del 95% di non essere dovuta al caso. L'output del T-Student è il cosiddetto *p-value*: più piccolo è questo valore e maggiore è la probabilità che ci sia una significatività nei dati. Nel caso specifico, il valore di p-value deve essere minore di 0.05, affinché si abbia una significatività di almeno il 95%.

In Tabella 5.4 sono stati riportati i risultati del test. Si evince come solo gli indici dei logotomi e della lunghezza delle tracce abbiano avuto un esito positivo. Dunque, dai risultati si denota che c'è stato un miglioramento effettivo dell'intelligibilità e un maggiore consumo delle energie cognitive per mantenersi in una posa stabile.

Test T-Student, con p-value < 0.05 (95% significatività)					
Logotomi	Ellisse OA	Ellisse OC	Traccia OA	Traccia OC	N.ro Centri
0.000	0.377	0.600	0.045	0.045	0.881

Tabella 5.4

Campione di Controllo

Anche per il campione di controllo sono stati riportati i risultati degli indici pre e post allenamento, suddivisi per l'esame audiometrico e stabilometrico. I due test sono stati eseguiti dopo un lasso di tempo di almeno un 30 minuti, in modo che i campioni non potessero assimilare la

tipologia di valutazione e diminuissero il loro livello di attenzione. In Figura 5.8, è stata riportata la percentuale di logotomi indovinata dai soggetti: si evidenzia un lieve miglioramento del 3%.

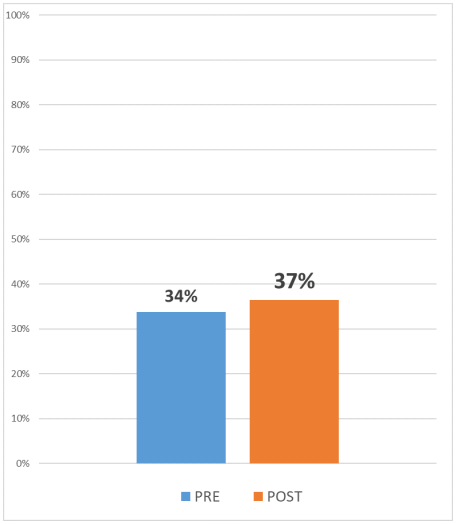

Figura 5.8: Campione di Controllo - Grafico Logotomi

Per quanto riguarda gli indici stabilometrici, si denota nel grafico (Figura 5.9) una generale diminuzione dei valori. Dunque, i soggetti avrebbero migliorato le proprie capacità nel restare in equilibrio sulla pedana, spendendo meno energie cognitive.

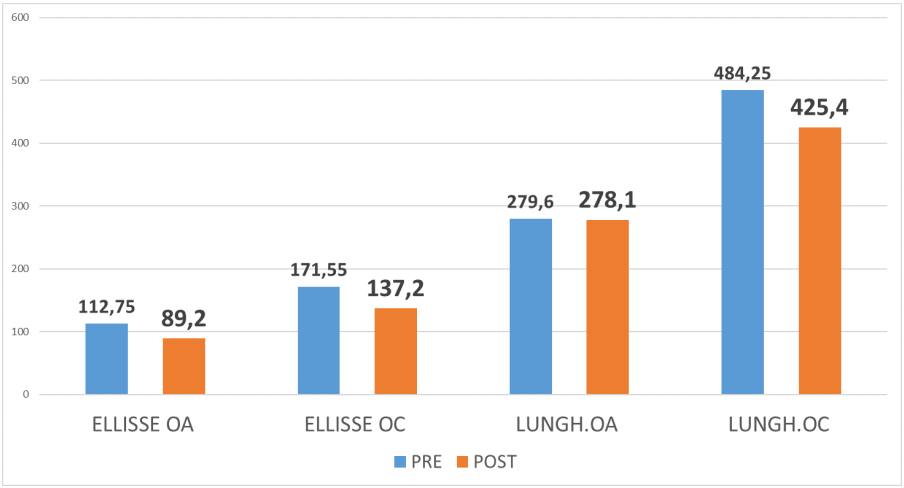

Figura 5.9: Campione di Controllo - Grafico Stabilometria

Infine, è stato eseguito il Test T-Student, per verificare se i dati effettivamente abbiano avuto un qualche significato statistico. Il test è stato condotto, confrontando per ciascun indice, i valori ottenuti dalla fase di Test e Retest. Dalla Tabella 5.5 è risultato come nessuno degli indici ha superato il test: quindi, è possibile dedurre che i miglioramenti avuti, siano stati solo frutto del caso, fisiologici.

Test T-Student, con p-value < 0.05 (95% significatività)					
Logotomi	Ellisse OA	Ellisse OC	Traccia OA	Traccia OC	N.ro Centri
0.428	0.119	0.055	0.900	0.065	0.724

Tabella 5.5

Confronto Campione di soggetti
Nel grafico in Figura 5.10 è stato messo a confronto il miglioramento dei logotomi del campione di studio con quello ottenuto dal gruppo di controllo. Questo miglioramento è stato del 23%, rispetto al 3% del gruppo di controllo , con rapporto di circa 8 : 1, ovvero il campione di studio ha ottenuto un miglioramento otto volte superiore a quello di controllo.

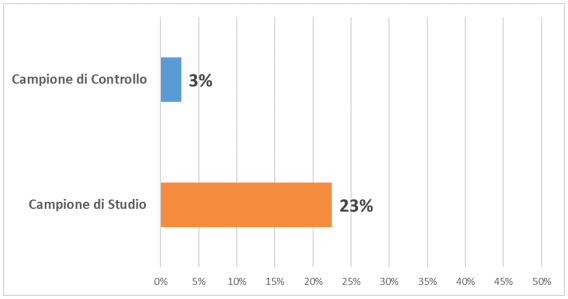

Figura 5.10: Confronto Logotomi Campione di Studio - Campione di Controllo

Per quanto riguarda la stabilometria (Figura 5.11), si osserva che, relativamente agli indici ad occhi aperti, il campione di studio è peggiorato in entrambe le valutazioni, mentre ad occhi chiusi, sebbene la dimensione dell'ellisse sia apparsa aumentata, è stato interessante notare come sia migliorata la traccia, la precisione/energia dei soggetti, rispetto al gruppo di controllo.

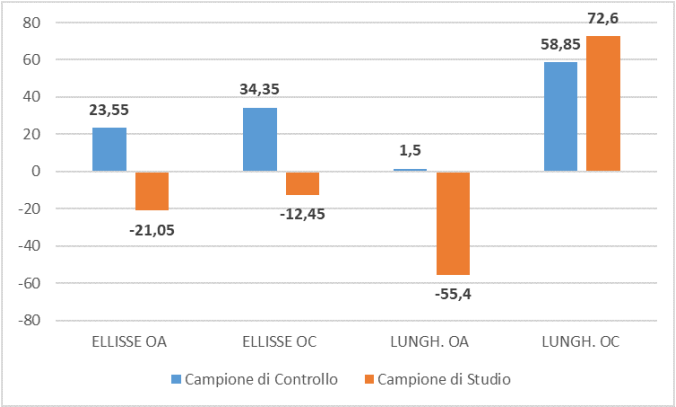

Figura 5.11: Confronto Logotomi Campione di Studio - Campione di Controllo: valori positivi indicano un miglioramento dell'indice.

In seguito, per verificare l'effettiva differenza di miglioramento degli indici dei due gruppi è stato eseguito il Test T-Student, disaccoppiato, per osservare se le differenze delle medie, dei miglioramenti dei due gruppi, abbiano avuto una significatività o meno. Dalla Tabella 5.6 l'indice dei logotomi è stato l'unico che abbia superato il test, ovvero la differenza di miglioramento di intelligibilità tra i due gruppi è risultata significativa.

Test T-Student, con p-value < 0.05 (95% significatività)					
Logotomi	Ellisse OA	Ellisse OC	Traccia OA	Traccia OC	N.ro Centri
0.000	0.113	0.113	0.055	0.763	0.852

Tabella 5.6

Infine, è stato condotto un ulteriore approccio all'analisi dei dati: per gli indici audiometrici e stabilometrici sono stati conteggiati il numero percentuale dei soggetti che effettivamente hanno ottenuto un miglioramento per il rispettivo test (Figura 5.12). L'idea era di valutare l'andamento dei due gruppi di campioni in modo da evidenziare comportamenti simili o diversi.

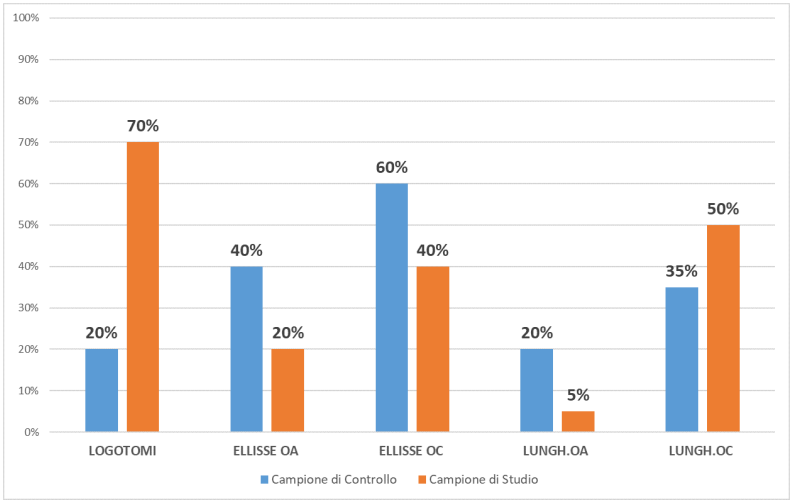

Figura 5.12: Nel grafico sono riporti per ciascun indice il numero percentuale di soggetti che sono migliorati rispettivamente per lo specifico test di valutazione.

5.2.2 Risultati test navigation

I due test sulla navigation sono stati somministrati ai soggetti, sia prima che dopo l'allenamento, per osservare il tipo di cambiamento degli indici. Dal grafico in Figura 5.13, sono state riportate le percentuali di punteggio, ottenute per l'esecuzione motoria e per la riproduzione su carta. In prima analisi, si osserva come i soggetti siano migliorati in entrambi i test, sottolineando nuovamente l'efficacia dell'allenamento.

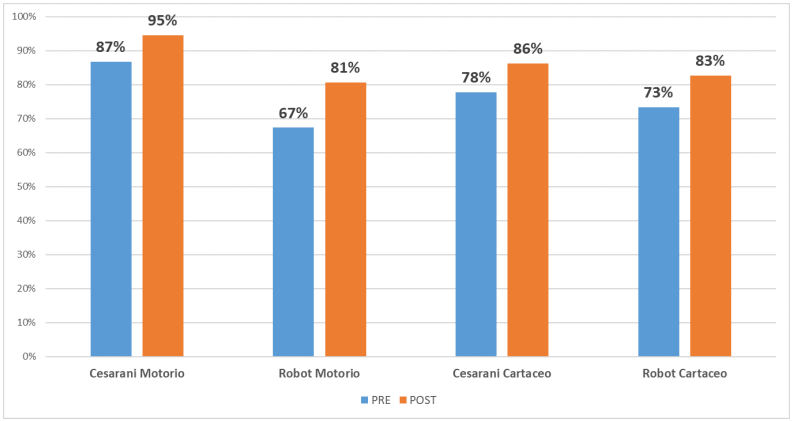

Figura 5.13: Confronto risultati Test di Cesarani - Test di Riproduzione speculare con il robot.

Nel dettaglio, sono state riportate le differenze dei punteggi (Figura 5.14), ottenute nelle due fasi: nell'esecuzione motoria con il robot c'è stato un miglioramento superiore nel Test di Riproduzione speculare (13%) rispetto al Test di Cesarani (8%), con una differenza del 5%, mentre per la riproduzione su carta non sono stare riscontrate differenze significative.

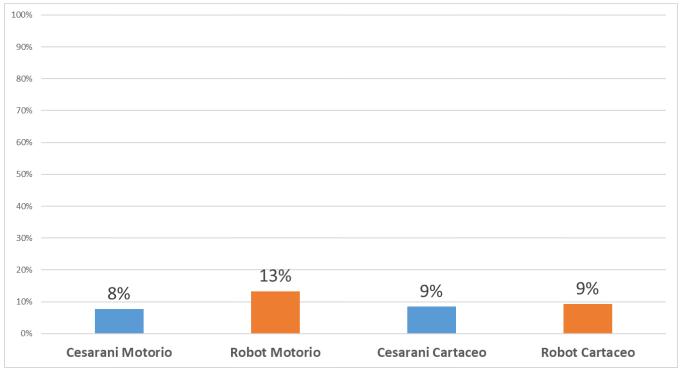

Figura 5.14: Confronto differenze Test di Cesarani - Test di Riproduzione speculare con il robot.

Infine, è stato condotto il Test T-Student sui dati, per confermarne la validità.

Test T-Student, con p-value < 0.05 (95% significatività)			
Cesarani Motorio	Cesarani Cartaceo	Robot Speculare	Robot Cartaceo
0.024	0.046	0.040	0.045

Tabella 5.7

5.2.3 Conclusioni

In prima analisi, dall'allenamento dei campioni di studio sono stati riscontrati due aspetti principali: un notevole miglioramento dei logotomi ed un peggioramento riguardo alle capacità di rimanere in una postura di equilibrio, evidenziata da un maggiore dispendio di energie cognitive. Il confronto con il gruppo di controllo ha sottolineato ulteriormente che l'allenamento abbia inciso sull'intelligibilità dei soggetti, dal momento che questi non hanno avuto alcuna variazione significativa nell'indice logotomico. In sintesi, c'è stato un miglioramento significativo della discriminazione delle parole nel rumore (logotomi), accompagnato, però, da una stanchezza cognitiva. Un'interpretazione di questo fenomeno si potrebbe fare soffermandosi sull'importanza dell'attenzione. L'attenzione è una caratteristica particolare dell'essere umano che gli consente di focalizzare le proprie energie cognitive su specifiche funzionalità (udito, equilibrio). Dal momento che sono stati eseguiti una serie di esercizi di localizzazione sonora e di navigation, senza l'uso del sistema visivo, c'è stato un effettivo sforzo cognitivo, che ha condotto i campioni ad aumentare i propri livelli di concentrazione. L'attenzione, elevata e continua, lungo un arco temporale dai 30-40 minuti, ha implicato come conseguenza un affaticamento dei soggetti, che ha probabilmente influenzato le prestazione di quest'ultimi, nella fase di post valutazione, nel mantenere la postura di equilibrio. D'altra parte, confrontando le tracce dei due gruppi di campioni, è stata osservata una tendenza particolare: infatti, sebbene ad occhi aperti i campioni di studio abbiano speso più energie cognitive per stare in equilibrio, ad occhi chiusi questi hanno ottenuto risultati positivi nella post valutazione, migliori al gruppo di controllo, il quale non ha avuto alcun tipo di affaticamento cognitivo. Avendo lavorato essenzialmente ad occhi chiusi, i soggetti, quindi, hanno migliorato le loro capacità uditive, vestibolari e di rappresentazione spaziale, cambiando la propria predisposizione mentale, attraverso una redistribuzione delle energie cognitive in riferimento alle specifiche funzionalità. Dal grafico in Figura 5.12 si osserva come l'allenamento con il robot abbia inciso in modo completamente differente sul gruppo di studio, rispetto al campione di controllo, andando ad enfatizzare specifiche funzionalità, confermando le supposizioni sull'intelligibilità e l'energia spesa. Dunque, il tipo di allenamento ha fatto sì che i soggetti del campione di studio spostassero il proprio focus dell'attenzione su queste specifiche funzionalità, enfatizzandole, attraverso una ridistribuzione delle energie cognitive. In aggiunta, il miglioramento degli indici di valutazione della navigation potrebbero dedurre un legame tra le capacità di percezione sonora e quelle in ambito navigation, quali rappresentazione spaziale, creazione di mappe mentali e memorizzazione a breve termine. Dalla navigation, sarebbe possibile ricondursi, a sua volta, alle funzionalità dell'ippocampo, il quale ha un ruolo fondamentale

per la navigazione spaziale, la trasformazione della memoria, da breve a lungo termine, e la memoria dichiarativa [63]. Dunque, si potrebbe fare un passo in più, ipotizzando un eventuale connessione o relazione biunivoca, tra l'intelligibilità e le funzionalità dell'ippocampo. Queste sono solo delle osservazioni empiriche, che non vogliono presumere nulla, ma indicare solo possibili studi futuri.

Per quanto riguarda il Test di Riproduzione speculare, dai risultati si denota come sia apparso più difficile del Test di Cesarani, ma abbia apportato un maggiore miglioramento. Una spiegazione del risultato potrebbe essere che, avendo i soggetti eseguito un allenamento con il robot, si siano meglio predisposti mentalmente nel Test di Riproduzione speculare. Dalle percentuali di successo (Figura 5.13) si osserva come i campioni abbiano avuto, nella fase di Test, un risultato superiore nel Test di Cesarani, rispetto alla valutazione con il robot, arrivando quasi al 100% dei risultati (esecuzione motoria), nella post valutazione. Il Test di Riproduzione speculare con il robot non ha mai superato, in valori assoluti, le percentuali del Test di Cesarani, assestandosi sotto l'85%. I campioni, dunque, non sono migliorati nel Test di Cesarani, dal momento che già avevano ottenuto un punteggio elevato, affermando ulteriormente la facilità di risoluzione, già citata, del test. Un altro dato interessante è quello sui i tempi di esecuzione dei test: infatti, nell'esecuzione motoria, i soggetti hanno impiegato, in media, più tempo per terminare il Test di Riproduzione speculare, mentre, nella riproduzione su carta, hanno avuto più difficoltà nel Test di Cesarani. Una possibile interpretazione potrebbe essere che nell'esecuzione motoria del Test di Cesarani i soggetti abbiano lavorato sul giusto piano uditivo, ricevendo comandi di tipo vocale, per una figura geometrica alquanto semplice (un quadrato), mentre con il robot, hanno dovuto interpretare i comandi, osservando il percorso tracciato, il quale non riproduceva nessuna figura nota al soggetto stesso. In aggiunta, nel Test di Riproduzione speculare i campioni non hanno ricevuto comandi in tempo reale, come nel Test di Cesarani, ma hanno dovuto memorizzare le informazioni visive. D'altra parte, le tempistiche sulla riproduzione su carta, hanno evidenziato un leggero cambio della tendenza. Tutto ciò è da ricondursi alle strategie e metodologie differenti, usate dai campioni nel risolvere i due test: per il Test di Cesarani, non tutti i campioni, nella riproduzione su carta, avevano compreso di aver disegnato per terra un quadrato, invece con il robot, accadeva che alcuni soggetti, nel cambiare direzione, resettassero il proprio sistema di coordinate, dimenticando l'orientamento dello specchio virtuale. Inoltre, è stato interessante osservare le strategie di risoluzione delle prove: alcuni, quando ricevevano il comando "torna al punto di partenze" (Test di Cesarani), ripercorrevano tutto il tragitto fatto a ritroso, rispetto ad altri, che avevano compreso il tipo di figura da disegnare; nel Test di Riproduzione speculare, invece, c'era chi si ripeteva, a voce o mentalmente, il percorso del robot, facendo anche uso della gestualità, o chi rifletteva sulla posizione finale del robot, facendo leva sulla propria rappresentazione spaziale.

In conclusione, elenchiamo i punti chiave della sperimentazione: in primo luogo, la validità del protocollo, dal momento che è stato osservato come l'allenamento, breve ed intenso, abbia comportato un cambiamento, seppur breve, della predisposizione mentale dei soggetti e della proprie funzionalità, sottolineando un andamento differente riguardo agli specifici indici, causato da uno spostamento del focus dell'attenzione. In secondo luogo, è stato interessante osservare le metodologie e le strategie di ogni soggetto nel rappresentarsi mentalmente la scena, durante le valutazioni sulla navigation. Nello specifico, il Test di Riproduzione speculare ha dimostrato di avere le potenzialità di offrire un test dalle svariate opportunità, quali: la possibilità di modificare e personalizzare il percorso alla patologia del campione, di aggiungere elementi nella scena, di aumentare lo span di memoria, di modificare i parametri del robot, di elaborare tracciati sui movimenti dei soggetti, da cui poi ottenere analisi sulle strategie da loro adottate e il rispettivo consumo energetico.

5.3 Questionari

Al termine dell'allenamento, sono stati somministrati dei questionari ai soggetti del gruppo di studio: il *"System Usability Scale"* (SUS) e il *"Physical Activity Enjoyment Scale"* (PACES). Il SUS è un questionario, composto da 10 domande, che definisce l'usabilità globale del sistema, in base all'esperienza di interazione avuta dall'utente [67] [68]. Le domande del questionario rispettano tre criteri di usabilità:

- l'efficacia, l'abilità dell'utente di completare dei compiti, usando il sistema;
- l'efficienza, il livello di energie consumate nel compito;
- la soddisfazione, la reazione soggettiva dell'utente nell'aver usato il sistema.

Il questionario è composto da due categorie di domande, positive e negative: le prime presentano un'affermazione a favore del sistema, le seconde una contraria. Gli utenti devono indicare, con un voto da 1 a 5, se sono in accordo o disaccordo con la i-esima affermazione. Il punteggio di ciascuna domanda è riportato su un intervallo da 0 a 4: per le domande positive si prende il valore della risposta e si sottrae 1, per quelle negative si sottrae il valore della risposta a 5. Una volta sommati i risultati di ciascun utente, si spalma il totale su un intervallo da 0 a 100, moltiplicando per 2.5.

In Figura 5.15 è stata riporta la distribuzione delle risposte al SUS: si evidenzia una media più che positiva intorno al valore di 74, con soli pochissimi risultati tra il 60 e 70.

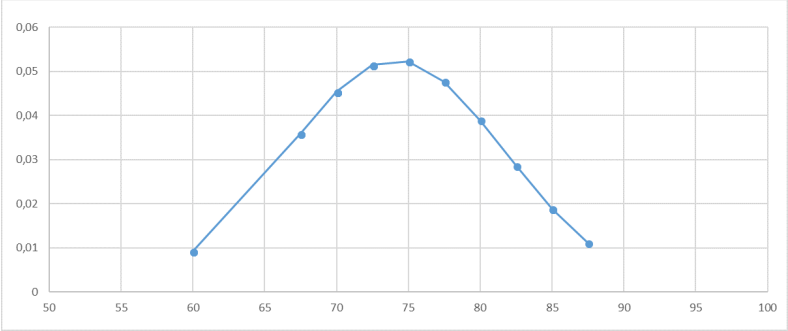

Figura 5.15: Distribuzione risposte SUS

Nello specifico, è stato analizzato, per ciascuna domanda, quanto in media fossero in accordo gli utenti. Nel grafico in Figura 5.16 sono state riportate le percentuali di accordo o disaccordo per ciascuna domanda: valori alti indicano che gli utenti, in media, si son trovati in accordo con la specifica affermazione, mentre, valori bassi rivelano un atteggiamento negativo per specifica affermazione. In sintesi, è possibile affermare che gli utenti hanno trovato le funzionalità del sistema ben integrate, facili da utilizzare, sentendosi a proprio agio. Inoltre, proverebbero piacere ad utilizzare in futuro il sistema, non valutandolo molto complesso.

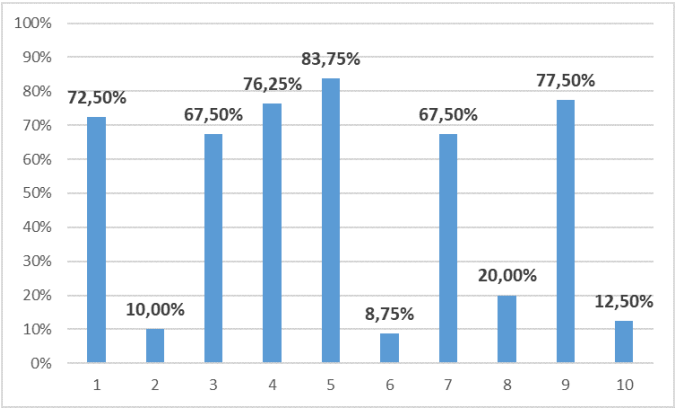

Figura 5.16: Percentuale di soddisfazione per ciascuna domanda SUS.

Il PACES è un questionario per valutare il piacere, il godimento di un'attività fisica, usando una scala di Likert bipolare, con valori da 1 a 7 [69] [70]. Il questionario è composto da 18 domande, positive e negative, mischiate tra loro. Ogni domanda presenta una coppia di affermazioni, che asseriscono, rispettivamente, ad un concetto positivo e negativo. Dunque, l'utente, nel andare a rispondere, deve decidere se sbilanciarsi (segnando il valore 1 o 7) per una delle due affermazioni. Tecnicamente, il valore di 4, rappresenterebbe un'emozione neutra per la i-esima domanda. Le domande non presentano il termine, positivo e negativo, sempre dallo stesso lato, in modo che l'utente non risponda a caso al questionario.

Come per il SUS, anche per il PACES è stato calcolato un punteggio diverso, in base al tipo di domanda. In questo caso, per suddividere le domande positive da quelle negative, è stato considerato il termine sulla colonna di sinistra, di ogni domanda, come indicato in [69]. Quindi, per le domande positive, è stato sottratto il valore della risposta a 7, mentre, per quelle negative è stato sottratto 1 alla risposta. Come risultato, si ottiene un punteggio da 0 a 6, che poi è stato riportato su un intervallo da 0 a 100, per avere una scala simile a quella del SUS.

La distribuzione delle risposte del PACES (Figura 5.17) presenta una media più alta (79), però, con una maggiore dispersione: sono presenti anche valori sotto al 65.

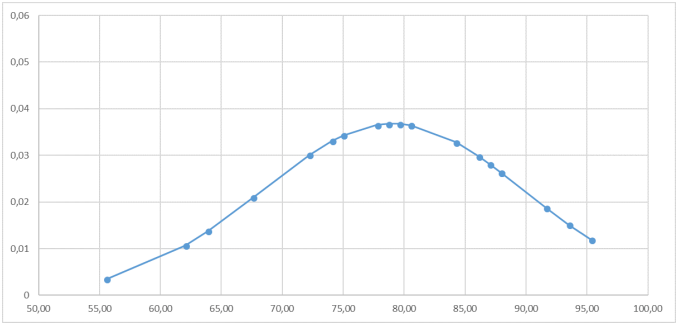

Figura 5.17: Distribuzione risposte PACES

Anche in questo questionario, è stata analizzata la soddisfazione degli utenti ad ogni singola domanda. Nel grafico in Figura 5.18 per ogni domanda è stata riportata una percentuale: valori alti, indicano che gli utenti, in media, si sono sbilanciati verso l'affermazione positiva. Dalla Figura, si evince che, in media, gli utenti hanno apprezzato il tipo di attività fisica: nel dettaglio, è possibile affermare che i soggetti si siano divertiti e abbiano trovato l'attività fisica molto gradevole ed interessante, coinvolgente e originale.

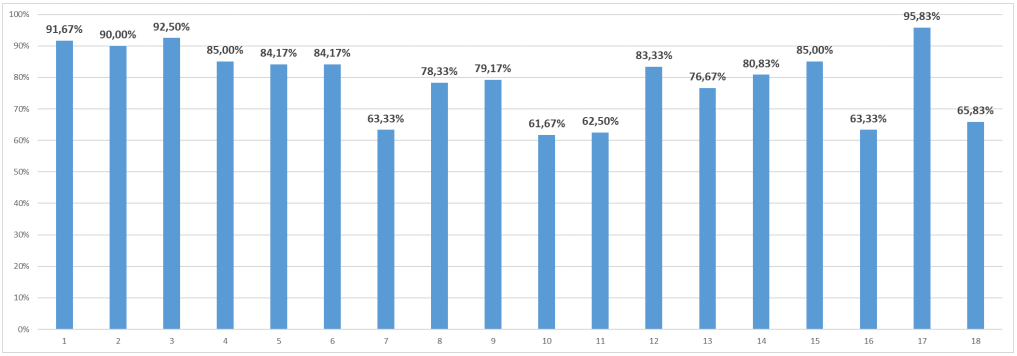

Figura 5.18: Percentuale di soddisfazione per ciascuna domanda PACES.

Capitolo 6

Conclusioni

Il lavoro di tesi ha dimostrato come il sistema proposto, robot più Vive Tracker, sia stato uno strumento valido per l'analisi e l'allenamento delle funzionalità uditive, vestibolari e relative alla navigation. Nel dettaglio, l'allenamento breve ed intenso, ha riscontrato la variazione significativa di almeno un indice: è stato osservato un notevole miglioramento nei campioni, relativo all'intelligibilità, al controllo della postura e dell'equilibrio ad occhi chiusi, alla rappresentazione spaziale, evidenziando una redistribuzione delle energie, dovuta ad uno spostamento del focus dell'attenzione sulle specifiche funzionalità. Il Test di Riproduzione Speculare ha dimostrato di avere validi punti di forza, rispetto al Test di Cesarani, quali la possibilità di avere una valutazione oggettiva, misurabile, tracciabile e personalizzabile.

Il progetto ha sottolineato come è stato possibile inserire in un ambiente ospedaliero, strumenti e dispositivi, tra loro integrati, per il training e la riabilitazione. Dal risultato dei questionari è stato evidenziato come i soggetti abbiamo apprezzato il tipo di attività fisica ed il sistema, valutandolo usabile, facile da capire, interessante, divertente. La maggior parte dei campioni vedrebbe volentieri l'introduzione di tale sistema/protocollo all'interno di un programma di training. La presenza del robot ha messo a proprio agio i soggetti, stimolandoli e motivandoli nell'esecuzione dell'allenamento. Inoltre, il sistema di tracking ha evidenziato le sue potenzialità durante la sperimentazione, quali la possibilità di valutare tracciati, strategie dei diversi campioni, consentendo analisi dettagliate e la realizzazione di grafici. In sintesi, è possibile affermare di aver realizzato un sistema, a basso costo, user-friendly, dalle innumerevoli potenzialità, poiché, dal momento in cui si hanno le capacità di controllare e tracciare, sia il robot che il giocatore, esistono svariati modi di diversificare il tipo di protocollo, come ad esempio ideando nuovi percorsi, movimenti e interazioni uomo-robot.

D'altra parte ci sono state delle problematiche, quali il tempo e la disponibilità limitata: infatti, non è stato possibile effettuare un vero e proprio programma di allenamento, con una serie di ripetizioni degli esercizi, per valutare andamenti temporali e regressioni, e non è stato possibile eseguire un'analisi su soggetti patologici, dal momento che i protocolli clinici si valutano prima su una popolazione sana, sia per verificare eventuali effetti collaterali e sia perché un campione patologico potrebbe avere delle variabili che sfuggirebbero al controllo. Per quanto riguarda la tecnologica utilizzata, bisognerebbe migliorare la configurazione del robot, integrando al meglio i dispositivi. Andrebbe rivalutato il controllo e la stabilità del robot, in maniera più tecnica, valutando anche l'eventualità di usare una tecnologia diversa.

Tra gli sviluppi futuri, c'è l'idea di ripetere il test sugli stessi campioni di studi: quello che ci aspettiamo è un ritorno ai valori normali degli indici, dal momento che un solo allenamento, breve ed inteso, non dovrebbe aver inciso in modo perenne sulle capacità delle persone. Il passo successivo, sarebbe quello di testare il protocollo sui soggetti patologici, adattandolo alle loro capacità. Inoltre, sarebbe interessante valutare altri indici ed utilizzi dei dati del tracker: ad esempio, si potrebbe considerare l'energia spesa dai campioni nell'eseguire il test speculare, confrontandolo con il punteggio ottenuto. Si potrebbero allenare anche le capacità propriocettive, prevedendo una superficie diversa di gioco (materassino). Valutare gli eventuali collegamenti tra il miglioramento dell'intelligibilità e le funzioni cerebrali (ippocampo). Prevedere diversi programmi di allenamento, in base al tipo di funzionalità da stimolare o riabilitare. Migliorare la

stabilità e il controllo del robot, offrendo un'interfaccia maggiormente usabile. Confrontare il sistema, con un applicazione in ambito realtà virtuale.

In conclusione, il lavoro di tesi ha dimostrato che i risultati della sperimentazione e l'elasticità del sistema hanno gettato le basi per lo sviluppo futuro di protocolli e metodologie d'allenamento o di riabilitazione, atte ad incidere su specifiche capacità e funzionalità dell'essere umano.

Elenco delle figure

2.1 Definizione di serious game. . . . 13
2.2 Storia dei serious game 13
2.3 America's Army 14
2.4 Metafora Chocolate covered broccoli 15
2.5 Tassonomia dei serious game 16
2.6 ViPOL 17
2.7 Lost Earth 2307 18
2.8 Ludwig 18
2.9 Yes or Know 19
2.10 Esempi di serious game 19
2.11 Modelli di health game 21
2.12 Teoria self-determination 21
2.13 Modello di Denis e Jouvelot 22
2.14 Tassonomia degli health game 23
2.15 Simple e Therapeutic Exergame 24
2.16 Modello Dual Flow 25
2.17 Struttura Exergame basata sul modello dual flow 26
2.18 Cancer Space e Re-Mission 27
2.19 Balance Fit 27
2.20 NeuroVitAALis 28
2.21 Jedi Trainer 30
2.22 Hit the answer to make NAO happy 31
2.23 GENTORO 31
2.24 PiTank 32
2.25 Robot Cellulo 32

3.1 Parrot Jumping Sumo 35
3.2 HTC Vive Vr System 36
3.3 Vive Tracker 36
3.4 Cassa Bluetooth 37
3.5 Ordine di esecuzione funzioni evento Unity. . . . 39

3.6 Controllore PID. 40

4.1 Test quadrato 1 Jumping Sumo 42
4.2 Test quadrato 2 Jumping Sumo 42
4.3 Test quadrato 3 Jumping Sumo 43
4.4 Test rettangolo Jumping Sumo 43
4.5 Test ellisse Jumping Sumo 44
4.6 Test scostamento laterale Jumping Sumo 44
4.7 Modulo controllore PID 45
4.8 Gioco 1 46
4.9 Gioco 2 47
4.10 Gioco 3 48
4.11 Gioco 4 48
4.12 Anatomia orecchio umano. 53
4.13 Diagramma Fletcher e Munson. 54
4.14 Localizzazione sonora. 55
4.15 Piani di localizzazione sonora. 55
4.16 Interaural time difference (ITD). 56
4.17 Effetto Haas. 57
4.18 Marcia su Percorsi Memorizzati. 60
4.19 Stabilometria. 61
4.20 Test di Cesarani. 62
4.21 Architettura del sistema. 64
4.22 Configurazione Jumping Sumo. 65
4.23 Area di gioco. 66
4.24 Regole Test di Riproduzione speculare 68
4.25 Percorsi Test di Riproduzione speculare 68
4.26 Quattro percorsi dell'Esercizio di Inseguimento 69
4.27 Confornto percorsi a forma di 8 dell'Esercizio di Inseguimento 70
4.28 Esperimenti Esercizio di Inseguimento 71
4.29 Circonferenza Esercizio di Localizzazione 72
4.30 Bussola Esercizio di Localizzazione 73

5.1 Percorsi definitivi Esercizio Inseguimento 77
5.2 Esempio Tracciati Test di Riproduzione speculare 78
5.3 Direzione Test di Riproduzione speculare 79
5.4 Lunghezza Test di Riproduzione speculare 80
5.5 Esempio Valutazione Test di Riproduzione speculare 81
5.6 Grafico Logotomi Campione di Studio 83
5.7 Grafico Stabilometria Campione di Studio 83

5.8 Grafico Logotomi Campione di Controllo 84
5.9 Grafico Stabilometria Campione di Controllo 84
5.10 Grafico Confronto Logotomi 85
5.11 Grafico Confronto Stabilometria 85
5.12 Confronto miglioramento indici 86
5.13 Confronto punteggi Test sulla Navigation 86
5.14 Confronto differenze Test sulla Navigation 87
5.15 Distribuzione risposte SUS 89
5.16 Grafico domande SUS 89
5.17 Distribuzione risposte PACES 90
5.18 Grafico domande PACES 90

Elenco delle tabelle

4.1 Test di Cesarani. 63
4.2 Comandi Test Riproduzione speculare 69
4.3 Tabelle Esercizio di Localizzazione 72

5.1 Fase di Test. 76
5.2 Esercizio Localizzazione Sonora 77
5.3 Indici Test Riproduzione speculare 80
5.4 Test T-Student Campione di studio 83
5.5 Test T-Student Campione di controllo 84
5.6 Test T-Student Confronto indici allenamento 85
5.7 Test T-Student Confronto indici navigation 87

Bibliografia

[1] Enciclopedia Treccani Online, *gioco*, http://www.treccani.it/vocabolario/gioco/

[2] C. Garvey, *Play*, 1990, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts

[3] J. Huizinga, *HOMO LUDENS: A STUDY OF THE PLAY-ELEMENT IN CULTURE*, 1949, ROUTLEDGE & KEGAN PAUL, ISBN 0 7100 0578 4

[4] Roger Caillois, *I Giochi e gli Uomini: la maschera e la vertigine*, 1958.

[5] Enciclopedia Treccani Online, *videogioco*, http://www.treccani.it/enciclopedia/videogioco/

[6] AESVI, *Il mercato dei videogiochi in italia*, 2017, http://www.aesvi.it/cms/attach/i_videogiochi_in_italia_nel_2017.pdf

[7] Must e D. Tybord, *Physical activity and sedentary behavior: a review of longitudinal studies of weight and adiposity in youth*, International Journal of Obesity, n. 29, 2005.

[8] A. Mark e I. JanssenI, *Relationship between screen time and metabolic syndrome in adolescent*, Journal of Public Health, vol. 30, 2008.

[9] MarketsandMarkets, *Augmented Reality and Virtual Reality Market*, February 2018, Report Code: SE 2288, https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/augmented-reality-virtual-reality-market-1185.html

[10] Tractica, *Robotics Market Forecasts*, https://www.tractica.com/research/robotics-market-forecasts/

[11] Tractica, *Robotics Market Restructuring Continues as Non-Industrial Robots Are Poised to Exceed 75 Percent of Total Revenue by the End of 2018*, https://www.tractica.com/newsroom/press-releases/robotics-market-restructuring-continues-as-non-industrial-robots-are-poised-to-exceed-75-

[12] Tractica, *The Robotics Industry Will Reach $237 Billion in Revenue Worldwide by 2022*, https://www.tractica.com/newsroom/press-releases/the-robotics-industry-will-reach-237-billion-in-revenue-worldwide-by-2022/

[13] Ralf Dörner, Stefan Göbel, Wolfgang Effelsberg and Josef Wiemeyer, *Serious Games*, Springer, March 2016, DOI 10.1007/978-3-319-40612-1 ISBN: 978-3-319-40612-1

[14] Alessandro De Gloria, Francesco Bellotti, Riccardo Berta, Elisa Lavagnino, *Serious Games for education and training*, Research Gate, February 2014, DOI 10.17083/ijsg.v1i1.11, https://www.researchgate.net/publication/286244094_Serious_Games_for_education_and_training

[15] Fedwa Laamarti, Mohamad Eid, and Abdulmotaleb El Saddik, *An Overview of Serious Games*, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Computer Games Technology, Volume 2014, January 2014 Article No. 11, Article ID 358152, DOI 10.1155/2014/358152, http://dx.doi.org/10.1155/2014/358152

[16] Jan D. Smeddinck, Digital Media Lab, TZI, University of Bremen, Germany *Games for Health* nel libro Entertainment Computing and Serious Games a cura di Dörner, R., Göbel, S., Kickmeier-Rust, M., Masuch, M., Zweig, K.A., Springer, 2016, pp. 212-264, DOI 10.1007/978-3-319-46152-6 10, https://www.springer.com/gp/book/9783319461519

[17] Guillaume Denis e Pierre Jouvelot, *Motivation-Driven Educational Game Design: Applying Best Practices to Music Education*, ACE ?05 Valencia, Spagna, DOI 10.1145/1178477.1178581, https://www.researchgate.net/publication/220982791

[18] Michele Pirovano, Elif Surer, Renato Mainetti, Pier Luca Lanzi, N. Alberto Borghese, *Exergaming and rehabilitation: A methodology for the design of effective and safe therapeutic exergames*, Entertainment Computing, Volume 14, Maggio 2016, Pagine 55-65,

DOI https://doi.org/10.1016/j.entcom.2015.10.002, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875952115000166?via%3Dihub
[19] Jeff Sinclair, Philip Hingston, Martin Masek, *Exergame development using the dual flow model*, Proceedings of the Sixth Australasian Conference on Interactive Entertainment, Article No. 11, Dicembre 2009, DOI 10.1145/1746050.1746061
[20] Yoonsin Oh, Stephen Yang, *Defining exergames & exergaming*, Conferenza: Meaningful Play 2010, Gennaio 2010, https://www.researchgate.net/publication/230794344_Defining_exergames_exergaming
[21] Penelope Sweetser, Peta Wyeth, *GameFlow: a model for evaluating player enjoyment in games*, ACM Computers in Entertainment (CIE) - Theoretical and Practical Computer Applications in Entertainment, Volume 3 Issue 3, Luglio 2005, DOI 10.1145/1077246.1077253, https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1077253
[22] D. Martinoia, D. Calandriello, A. Bonarini, *Physically Interactive Robogames: Definition and design guidelines*, Robotics and Autonomous Systems (2013), DOI http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2013.04.017
[23] Adam H. M. Pinto, Daniel C. Tozadore, Roseli A. F. Romero, *A Question Game for Children Aiming the Geometrical Figures Learning by Using a Humanoid Robot*, 2015 12th Latin American Robotics Symposium and 2015 Third Brazilian Symposium on Robotics, DOI 10.1109/LARS-SBR.2015.62 , https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7402170
[24] Masanori Sugimoto,*A Mobile Mixed-Reality Environment for Children's Storytelling Using a Handheld Projector and a Robot*, IEEE TRANSACTIONS ON LEARNING TECHNOLOGIES, VOL. 4, NO. 3, JULY-SEPTEMBER 2011, DOI 10.1109/TLT.2011.13, https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5744068
[25] Hugo Costa, Peter Cebola, Tiago Cunha, *A Mixed Reality Game using 3Pi Robots - PiTanks*, Information Systems and Technologies (CISTI), 2015 10th Iberian Conference on, DOI 10.1109/CISTI.2015.7170600, https://ieeexplore.ieee.org/document/7170600/
[26] Ayberk Özgür, Séverin Lemaignan, Wafa Johal, Maria Beltran, Manon Briod, Léa Pereyre, Francesco Mondada, Pierre Dillenbourg, *Cellulo: Versatile Handheld Robots for Education*, HRI '17 Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction, Pagine 119-127, Vienna, Austria, Marzo 06 - 09, 2017, DOI 10.1145/2909824.3020247, https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3020247
[27] Sito ufficiale *Parrot Jumping Sumo*, https://www.parrot.com/it/minidroni/parrot-jumping-sumo
[28] Sito ufficiale *Parrot for developers*, http://developer.parrot.com/
[29] Parrot SA, *ARSDK Protocols*, 4 Novembre 2015, https://developer.parrot.com/docs/SDK3/ARSDK_Protocols.pdf
[30] Wikipedia, *Software development kit (SDK)*, https://it.wikipedia.org/wiki/Software_development_kit
[31] Sito ufficiale Supporto *Parrot Jumping Sumo*, https://www.parrot.com/it/support/product/parrot-jumping-sumo
[32] Wikipedia, *Valve Corporation*, https://it.wikipedia.org/wiki/Valve_Corporation
[33] Wikipedia, *HTC*, https://it.wikipedia.org/wiki/HTC
[34] Wikipedia, *HTC Vive*, https://en.wikipedia.org/wiki/HTC_Vive
[35] Steam, *HTC Vive*, https://store.steampowered.com/app/358040/HTC_Vive/
[36] Sito ufficiale *HTC Vive*, https://www.vive.com
[37] *HTC Vive Tracker Developer Guidelines Ver. 1.3*, https://dl.vive.com/Tracker/Guideline/HTC_Vive_Tracker_Developer_Guidelines_v1.3.pdf
[38] Libreria Jumping Sumo *Devoxx4kids*, https://github.com/Devoxx4KidsDE/workshop-jumping-sumo
[39] Sito Ufficiale *Devoxx4kids*, http://www.devoxx4kids.org/
[40] Sito ufficiale *Java*, https://java.com/it/
[41] Wikipedia, *Little Endian*, https://it.wikipedia.org/wiki/Ordine_dei_byte
[42] Wikipedia, *Trasmission Controll Protocol (TCP)*, https://it.wikipedia.org/wiki/Transmission_Control_Protocol
[43] Wikipedia, *User Datagram Protocol*, https://it.wikipedia.org/wiki/User_Datagram_Protocol

[44] Wikipedia, *C#*, https://it.wikipedia.org/wiki/C_sharp
[45] Wikipedia, *JavaScript*, https://it.wikipedia.org/wiki/JavaScript
[46] Sito Ufficiale *MonoDevelop*, https://www.monodevelop.com/
[47] Sito Ufficiale *Microsoft .NET*, https://www.microsoft.com/net/
[48] Sito Ufficiale *Unity3D*, https://unity3d.com/
[49] Alex Peer, Peter Ullich, Kevin Ponto, *Vive Tracking Alignment and Correction Made Easy*, Virtual Environments, Wisconsin Institute for Discovery University of Wisconsin-Madison, USA, https://www.researchgate.net/publication/323969887_Vive_Tracking_Alignment_and_Correction_Made_Easy
[50] Diederick C. Niehorster, Li Li, Markus Lappe, *The Accuracy and Precision of Position and Orientation Tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for Scientific Research*, i-Perception May-June 2017, 1-23, DOI 10.1177/2041669517708205, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5439658/pdf/10.1177_2041669517708205.pdf
[51] Visioli, Antonio, Zhong, Qingchang, *Control of Integral Processes with Dead Time*, Springer, Chapter 2, 2011, ISBN 978-0-85729-070-0, https://www.springer.com/it/book/9780857290694
[52] Vincenzo Lombardo, Andrea Valle, *Audio e multimedia*, Capitoli 1, 5 e 10, Apogeo, 2002, ISBN 88-7303-986-3
[53] S.Carlile, *Virtual Auditory Space: Generation and Applications*, Capitolo 2 The Physical and Psychophysical Basis of Sound Localization, Landes Company, 1996.
[54] John Watkinson, *The Art of Digital Audio*, Capitolo 2, Butterworth-Heinemann Newton, MA, USA ©1993, ISBN:0240513207.
[55] Giorgio Guidetti, *La terapia riabilitativa nei disturbi dell'equilibrio*, otoneurologia 2000, numero 23, Marzo 2006.
[56] Sito Studio di Otorinolaringoiatria Tanzariello, *Esame stabilometrico con pedana computerizzata*, 2012, http://www.tanzariello.it/index.php/orecchio/esami-orecchio/38-studio-prof-a-tanzariello/orecchio/esami/sezione-di-vestibologia-con-sistema-integrato-per-indagini-vestibolari-obiettive-computer
200-esame-stabilometrico-con-pedana-computerizzata
[57] Sito Studio di Otorinolaringoiatria Tanzariello, *Audiometria tonale liminare (via aerea / via ossea)*, 2012, http://www.tanzariello.it/index.php/orecchio/esami-orecchio/55-studio-prof-a-tanzariello/orecchio/esami/sezione-di-audiologia-adulti/59-audiometria-tonale-liminare-via-aerea-via-ossea
[58] Wikipedia, *Hearing Level*, https://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_level
[59] Del Bo M., Giaccai F., Grisanti G., *Manuale di Audiologia*, 1984, Masson Italia Editori s.p.a., Milano.
[60] Calogero B., *Audiologia*, 1983, Monduzzi Editore s.r.l., Bologna.
[61] Wikipedia, *Ipoacusia*, https://it.wikipedia.org/wiki/Ipoacusia
[62] Jack M. Loomis, Reginald G. Golledge, Roberta L. Klatzky, *Navigation System for the Blind: Auditory Display Modes and Guidance*, Presence, Vol. 7, No. 2, April 1998, 193?203, by the Massachusetts Institute of Technology.
[63] Thomas Brandta, Andreas Zwergalb, Stefan Glasauer, *3-D spatial memory and navigation: functions and disorders*, Current Opinion in Neurology, December 2016, DOI 10.1097/WCO.0000000000000415, https://www.researchgate.net/publication/311567197
[64] Brugnoni Guido, Alpini Dario, *Medicina fisica e riabilitativa nei disturbi di equilibrio*, Springer-Verlag Mailand, 2007, eBook ISBN 978-88-470-0577-8, DOI 10.1007/978-88-470-0577-8
[65] Sito Medicina per tutti, *Punti e linee di repere*, 1 giugno 2018.
[66] Sito Regolazione Controllo Traffico, *Avvisatore Acustico AVA7*, Omologazione rilasciata dal ministero dei trasporti e delle infrastrutture N° 2485 del 19/12/2003, http://www.regolazionecontrollotraffico.com/prodotto/avvisatore-acustico-ipovedenti/
[67] Simone Borsci, Stefano Federici, Marco Lauriola, *On the dimensionality of the System Usability Scale: a test of alternative measurements model*, 30 June 2009, Marta Olivetti Belardinelli and Springer-Verlag, DOI 10.1007/s10339-009-0268-9, http://www.cognitivelab.it/wp-content/uploads/2010/09/Borsci-et-al-2009-On-the-Dimensionality-of-the-SUS1.pdf

[68] John Brooke, *SUS - A quick and dirty usability scale*, 1996, Taylor & Francis

[69] Deborah Kendzierski, Kenneth J. DeCarlo, *Physical Activity Enjoyment Scale: Two Validation Studies*, Department of Psychology, Villanova University, 13 Giugno 1990, https://www.researchgate.net/publication/232435324_Physical_Activity_Enjoyment_Scale_Two_validation_studies

[70] Carolyn J. Murrock, Abir Bekhet, Jaclene A. Zauszniewski, *Psychometric Evaluation of the Physical Activity Enjoyment Scale in Adults with Functional Limitations*, Issues in Mental Health Nursing, Vol. 37, No. 3, 2016, Taylor & Francis, DOI 10.3109/01612840.2015.1088904, https://epublications.marquette.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.it/&httpsredir=1&article=1432&context=nursing_fac