Politecnico di Torino

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Sessione di Laurea di Aprile 2022

Stimulating sickness to prevent sickness

Design and development of a testbed to study cybersickness mitigation techniques in VR

Relatore:

Prof. Fabrizio Lamberti

Correlatore:

Ing. Davide Calandra

Candidato:

Lorenzo Cannillo

Ringrazio la mia famiglia, e principalmente Marina, Sergio e Vanessa, per avermi supportato incondizionatamente nei momenti felici e nei periodi più duri, e per avermi sempre spronato a dare il meglio di me e a raggiungere i miei obiettivi.

Ringrazio la mia fidanzata, Anna, di cui non potrei mai privarmi, che mi supporta e sopporta da quasi quattro anni, che mi ha aiutato attivamente in tutte le fasi di svolgimento di questa tesi e che ha sempre creduto nelle mie capacità.

Ringrazio tutti i miei amici, per aver ascoltato le mie preoccupazioni, per le risate e i momenti più sereni, e per l'enorme aiuto fornito.

Ringrazio il mio correlatore, l'ing. Davide Calandra, per l'importante supporto e conforto fornito durante tutte le fasi di questa tesi, e per avermi saputo guidare al meglio al completamento di questo progetto.

Ringrazio tutti i volontari che hanno effettuato i miei test, per essere stati sempre disponibili e per essere giunti in mio soccorso nei momenti più disparati.

Ringrazio, infine, il mio relatore, il prof. Fabrizio Lamberti, per i suggerimenti e le preziose indicazioni fornite, che mi hanno permesso di completare il mio lavoro traendo importanti insegnamenti, di cui farò tesoro.

Sommario

La realtà virtuale, o *virtual reality* (VR), consente di immergere l'utente in un ambiente virtuale, o *virtual environment* (VE), tridimensionale. Il suo utilizzo sta crescendo in maniera esponenziale, grazie allo sviluppo di soluzioni hardware di qualità (principalmente in termini di visori) sempre più economici e, quindi, più accessibili.

Nonostante ciò, la tecnologia alla base delle esperienze VR è affetta da una serie di problemi che ne limitano, in qualche modo, il livello di usabilità. Il problema di maggiore interesse è correlato ad alcuni effetti negativi, o sintomi, che possono presentarsi durante esposizioni di medio-lunga durata al VE. Tali sintomi, generalmente raggruppati in tre categorie principali (sintomi connessi alla nausea, oculomotori e di disorientamento), costituiscono la base del fenomeno della cosiddetta *cybersickness*: questa non deve essere confusa con la *motion sickness* e la *simulator sickness*, in quanto, sebbene gli effetti subiti dagli utenti siano confrontabili, le ragioni che ne causano la comparsa sono molto differenti.

Ad oggi, non esiste una soluzione generalmente valida, dal punto di vista software o hardware, in grado di eliminare o quanto meno ridurre gli effetti indesiderati della VR sugli utenti. Nel corso degli anni sono però state proposte alcune tecniche per provare a ridurre l'entità dei sintomi, ed alcune di esse hanno ottenuto dei risultati positivi, tanto da essere attualmente piuttosto diffuse: tra queste, la riduzione del campo visivo dell'utente durante il movimento nel VE risulta essere la soluzione software maggiormente adottata.

Le tecniche proposte risultano essere molto diverse tra loro, e spesso non sono applicabili indistintamente ad ogni applicazione VR. Ancora più critico è inoltre il fatto che, ad oggi, non esistano strumenti che permettano di confrontare le singole tecniche in contesti applicativi differenti.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è quindi quello di produrre uno strumento, un cosiddetto *testbed*, consistente in quattro scenari VR, tra loro diversificati in termini di caratteristiche e finalità, progettati in modo tale da includere, riducendo al minimo le sovrapposizioni, la maggior parte degli elementi presenti nelle applicazioni VR di larga diffusione. Il fine ultimo di tali scenari è quello di generare negli utenti differenti effetti indesiderati della cybersickness, in modo tale da poterli utilizzare per la misurazione delle eventuali variazioni indotte dall'impiego di tecniche di mitigazione. In questo modo, il testbed potrà essere utilizzato per valutare l'efficacia delle soluzioni proposte nel tempo.

Nella tesi, il testbed è stato valutato effettuando 17 test per scenario per un totale di 68 test, coinvolgendo su base volontaria utenti con caratteristiche eterogenee. I risultati ottenuti hanno dimostrato, innanzitutto, che tutti gli scenari sono stati in grado di generare negli utenti livelli di cybersickness non trascurabili. Inoltre, è stato possibile osservare le differenti intensità registrate per i singoli sintomi nei diversi scenari. Ciò ha consentito di identificare le differenze tra i quattro scenari in termini di intensità media della cybersickness generata negli utenti e di verificare, pertanto, la presenza di differenze funzionali intrinseche nei quattro scenari e, soprattutto, l'efficacia stessa dello strumento di testbed realizzato.

Indice

Sommario V

Elenco delle figure XIII

1.Introduzione 1

1.1 Contesto **1**

1.2 Obiettivi della tesi **2**

1.3 Struttura del documento **2**

2.Cybersickness 3

2.1 Sintomi e fattori influenzanti **3**

2.1.1 Fattori anagrafici e individuali **4**

2.1.2 Fattori dipendenti dai dispositivi hardware **5**

2.1.3 Fattori relativi al software e ai task dell'utente VR **6**

2.2 Cybersickness, motion sickness e simulator sickness **7**

2.3 Cause e teorie sull'origine del fenomeno **7**

2.3.1 Teoria del conflitto sensoriale **8**

2.3.2 Teoria dell'avvelenamento **8**

2.3.3 Teoria dell'instabilità posturale **8**

2.4 Misure della Cybersickness **9**

2.3.1 Misure soggettive **9**

2.3.2 Misure oggettive **11**

3.Stato dell'Arte **12**

3.1 Introduzione **12**

3.2 Field Of View (FOV) **12**

3.3 Blur **14**

3.4 Rest frame **16**

3.5 View-point repositioning **17**

3.6 Optical flow **18**

3.7 Alterazione geometrica del VE **19**

3.8 Depth of Field (DOF) **21**

3.9 Hardware esterni **22**

3.10 Soluzioni ibride **23**

4.Realizzazione e procedura sperimentale **24**

4.1 Rollercoaster – Uncontrolled Follow Path **25**

4.1.1 Design **25**

4.1.2 Task **26**

4.1.3 Misura delle prestazioni **26**

4.1.4 Utilità **27**

4.2 Tower Defense - Shooter **28**

4.2.1 Design **28**

4.2.2 Task **30**

4.2.3 Misura delle prestazioni **30**

4.2.4 Utilità **31**

4.3 Viking Village – Waypoint Navigation **32**

4.3.1 Design **32**

4.3.2 Task **33**

4.3.3 Misura delle prestazioni **34**

4.3.4 Utilità 34
4.4 Track Race – Driving Uphill/Downhill 35
4.4.1 Design 35
4.4.2 Task 36
4.4.3 Misura delle prestazioni 36
4.4.4 Utilità 37
4.5 Procedura 37
4.5.1 Pre esperienza 37
4.5.2 Durante l'esperienza 40
4.5.3 Successivamente all'esperienza 40
4.4.4 Partecipanti 42
4.4.5 Materiali e Apparati 43

5. Risultati e discussione 44
5.1 Partecipanti 44
5.2 Rollercoaster – Uncontrolled Follow Path 44
5.2.1 Composizione partecipanti 44
5.2.2 SSQ 44
5.2.3 VRSQ 45
5.2.4 F-SSQ 45
5.2.5 CSQ 45
5.2.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione 46
5.2.7 Classifica sintomi per intensità media 47
5.2.8 Misure oggettive 47
5.2.9 Prestazioni 48
5.2.10 Correlazioni 48
5.2.11 Discussione dei risultati dello scenario 48

5.3 Tower Defense – Shooter **49**

5.3.1 Composizione partecipanti **49**

5.3.2 SSQ **49**

5.3.3 VRSQ **50**

5.3.4 F-SSQ **50**

5.3.5 CSQ **50**

5.3.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione **51**

5.3.7 Classifica sintomi per intensità media **51**

5.3.8 Misure oggettive **52**

5.3.9 Prestazioni **52**

5.3.10 Correlazioni **53**

5.3.11 Discussione dei risultati dello scenario **53**

5.4 Viking Village – Waypoint Navigation **54**

5.4.1 Composizione partecipanti **54**

5.4.2 SSQ **54**

5.4.3 VRSQ **54**

5.4.4 F-SSQ **54**

5.4.5 CSQ **55**

5.4.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione **55**

5.4.7 Classifica sintomi per intensità media **55**

5.4.8 Misure oggettive **56**

5.4.9 Prestazioni **56**

5.4.10 Correlazioni **57**

5.4.11 Discussione dei risultati dello scenario **57**

5.5 Track Race – Driving Uphill/Downhill **59**

5.5.1 Composizione partecipanti **59**

5.5.2 SSQ **59**

5.5.3 VRSQ 59
5.5.4 F-SSQ 59
5.5.5 CSQ 60
5.5.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione 60
5.5.7 Classifica sintomi per intensità media 61
5.5.8 Misure oggettive 61
5.5.9 Prestazioni 62
5.5.10 Correlazioni 62
5.5.11 Discussione dei risultati dello scenario 62
5.6 Confronto tra scenari 63
5.6.1 Ipotesi 64
5.6.2 Risultati empirici 68
5.6.3 Analisi statistiche 71

6. Conclusioni e sviluppi futuri 75
6.1 Conclusioni 75
6.2 Sviluppi futuri 76

A. Appendice – Questionari 78

Bibliografia 82

Elenco delle figure

3.1	Esempio di riduzione del FOV con vignettatura e Circle Effect	13
3.2	Esempio di applicazione del Rotational Dynamic Gaussian Blur	14
3.3	Esempio di applicazione dell'algoritmo di Saliency Detection e del Dynamic Color-Based Gaussian Blur	15
3.4	Esempio di funzionamento della tecnica di Texture Blur	15
3.5	Esempio di utilizzo delle tecniche Virtual Nose e Virtual Cave	16
3.6	Funzionamento della tecnica View Point Snapper	17
3.7	Funzionamento della tecnica Vision Lock	18
3.8	Esempio di applicazione del Dot Effect	19
3.9	Esempio semplificato del funzionamento della Deformazione Geometrica dell'ambiente	20
3.10	Esempio di applicazione delle Cage/Lattice della Deformazione Geometrica	20
3.11	Esempio grafico dell'applicazione del Gaze-Contingent Depth of Field	21
3.12	Esempio di applicazione sugli utenti delle tecniche di mitigazione hardware	22
3.13	Esempio di utilizzo della tecnica di VR Tunneling con sfocatura periferica e con Cage	23
4.1	Tratto iniziale, intermedio, finale e giro della morte nel circuito dello scenario Rollercoaster	25
4.2	Esempio di cartellone del Task dello scenario Rollercoaster	26
4.3	Torre e porzione di ambiente naturale circostante l'utente nello scenario Tower Defense e visuale dell'utente nello scenario Tower Defense	28

4.4	Modello 3D dell'arma virtuale dello scenario Tower Defense	29
4.5	Modelli 3D dei nemici terreni e aerei dello scenario Tower Defense	30
4.6	Visuale dall'alto dell'ambiente dello scenario Viking Village	32
4.7	Visuale dell'utente in prima persona negli spazi aperti e interni dello scenario Viking Village	32
4.8	Esempio di ostacoli per l'utente nello scenario Viking Village	33
4.9	Moneta virtuale a base del Task dello scenario Viking Village	33
4.10	Visuale dall'alto del circuito dello scenario Track Race	35
4.11	Visuale in prima persona dall'interno del circuito dello scenario Track Race	35
4.12	Tabella dei sintomi e delle relative appartenenze alle categorie del questionario SSQ	39
4.13	Sintomi e classi di appartenenza nei differenti questionari soggettivi	42
5.1	Grafico a barre dei sintomi in ordine di frequenza nello scenario RC	46
5.2	Grafico a barre dei sintomi in ordine di intensità media nello scenario RC	47
5.3	Grafico a barre dei sintomi in ordine di frequenza nello scenario TD	51
5.4	Grafico a barre dei sintomi in ordine di intensità media nello scenario TD	52
5.5	Grafico a barre dei sintomi in ordine di frequenza nello scenario VV	55
5.6	Grafico a barre dei sintomi in ordine di intensità media nello scenario VV	56
5.7	Grafico a barre dei sintomi in ordine di frequenza nello scenario TR	60
5.8	Grafico a barre dei sintomi in ordine di intensità media nello scenario TR	61
5.9	Tabella dell'influenza dei fattori funzionali sugli scenari del testbed	68
5.10	Tabella riassuntiva dei risultati dei test: SSQ, F-SSQ, CSQ, sintomi di intensità maggiore	69
5.11	Istogramma delle intensità normalizzate dei punteggi dell'F-SSQ per i quattro scenari	70
5.12	Tabella dei risultati delle analisi statistiche (ANOVA e T-test)	74

1.Introduzione

1.1 Contesto

Nell'ultimo decennio, la tecnologia su cui si basa la realtà virtuale, o *virtual reality* (VR), è divenuta sempre più economica e avanzata. Ciò ha consentito una maggiore diffusione di soluzioni hardware, talvolta dal costo notevolmente ridotto (ad esempio, i Google Cardboard), aumentando considerevolmente il numero di utenti e incrementando, in contemporanea, la gamma di applicazioni pratiche in cui la VR occupa un ruolo essenziale o di elevata importanza e utilità: aree come l'intrattenimento videoludico e artistico, la formazione [22], la riabilitazione (terapia per fobie e/o ansie, ecc.) ne costituiscono solo alcuni esempi.

Tale costante crescita nella diffusione della VR, ha però causato, come conseguenza diretta, l'incremento della necessità di identificare soluzioni valide e funzionanti per ridurre gli effetti del problema che accompagna questa tecnologia sin dalla sua nascita, ovvero la cosiddetta *cybersickness*: essa consiste in effetti indesiderati di varia entità, subiti dagli utenti durante esposizioni di medio-lunga durata all'ambiente virtuale, o *virtual environment* (VE), i quali logorano l'esperienza degli individui causando veri e propri malesseri e non consentendo, pertanto, un'esposizione prolungata nel VE, avendo quindi effetti negativi su prestazioni e/o apprendimento.

La centralità del problema della cybersickness ha portato allo svolgimento di numerosi studi, i cui obiettivi variano dalla ricerca di soluzioni efficaci, ripetibili e applicabili in diversi ambiti (dal gaming alla formazione), all'analisi delle possibili cause che portano alla comparsa di tali effetti indesiderati. Il problema è, però, ben lontano dalla soluzione definitiva, in quanto persino le cause non risultano ancora completamente note, come si può osservare dalle differenze e dalle contraddizioni reciproche presenti tra le maggiori teorie sviluppate negli anni (di cui si parlerà nel Capitolo 2).

La misurazione degli effetti della cybersickness sugli utenti è un ulteriore difficoltà. In primo luogo, i sintomi risultano numerosi e tra loro variegati; inoltre, anche la loro durata e gravità percepita variano da individuo a individuo, in quanto i diversi utenti possono avere differenze individuali anche molto pronunciate, a partire dall'età, sesso ed esperienze pregresse con la VR. Infine, è molto difficile ottenere misurazioni temporalmente precise durante l'esperienza nel VE: la procedura più diffusa consiste, infatti, in questionari soggettivi da compilare prima e/o dopo l'esperienza, mentre durante

l'esecuzione risulta difficile ottenere indicazioni soggettive dall'utente senza ridurne senso di presenza o immersione.

1.2 Obiettivi della tesi

L'obiettivo di questo lavoro di tesi consiste, pertanto, nel realizzare e fornire uno strumento software, un cosiddetto *testbed*, attraverso il quale testare e valutare gli effetti di cybersickness subiti dagli utenti in quattro scenari progettati appositamente per replicare gli elementi più diffusi e comuni nelle applicazioni VR, riducendo al minimo le sovrapposizioni, e per generare in essi differenti effetti indesiderati di questa sickness VR. L'efficacia dei singoli scenari verrà valutata su alcuni utenti di test tramite misurazioni soggettive e oggettive; i risultati ottenuti consentiranno di valutare la validità e la funzionalità di questo testbed, permettendo di trarre conclusioni sul corretto funzionamento dei singoli scenari e, principalmente, di effettuarne un confronto in termini di tipologia di cybersickness generata da ognuno di essi.

1.3 Struttura del documento

Il documento di tesi è suddiviso nei seguenti capitoli.

- **Capitolo 1: Introduzione**
  Illustra il contesto su cui si basa il progetto di tesi gli obiettivi prefissati per il lavoro.
- **Capitolo 2: Cybersickness**
  Fornisce un approfondimento sul problema della cybersickness nelle applicazioni VR concentrato su differenze con motion sickness e simulation sickness, sintomi e fattori influenzanti, teorie sulla sua origine e tecniche di misurazione.
- **Capitolo 3: Stato dell'arte**
  Include una spiegazione approfondita dello stato dell'arte attuale delle tecniche di mitigazione proposte, in diversi studi, per attenuare il problema della cybersickness.
- **Capitolo 4: Realizzazione e procedura sperimentale**
  Riporta un resoconto della realizzazione dello strumento in termini di progettazione, obiettivi, misure ed utilità per il singolo scenario, assieme ad una descrizione approfondita della procedura seguita per i test.
- **Capitolo 5: Risultati e discussione**
  Analizza i risultati raccolti attraverso i test e riporta una discussione su tali risultati per il singolo scenario e, globalmente, per il testbed.
- **Capitolo 6: Conclusioni e sviluppi futuri**
  Fornisce le conclusioni del lavoro svolto, descrivendo gli obiettivi raggiunti, i limiti riscontrati ed i miglioramenti apportabili in futuro.

2.Cybersickness

Il termine cybersickness (talvolta sostituito con *Visually Induced Motion Sickness*, o VIMS) viene utilizzato, negli ultimi decenni, per fare riferimento ad un problema importante presente con l'attuale tecnologia per la VR, che consiste nella tendenza degli utenti ad esibire sintomi, di differente natura e intensità, durante e dopo l'esperienza di immersione in prima persona all'interno di un VE [1,2].

In questo capitolo verranno in primo luogo trattati i sintomi e i fattori influenzanti che costituiscono parte delle cause e conseguenze più note della cybersickness. A seguire, insieme alla spiegazione delle differenze principali dalle precedenti tipologie di sickness (motion sickness e simulator sickness), verranno presentate le tre teorie principali riguardanti l'origine degli effetti negativi della sickness sul corpo degli utenti: la teoria del conflitto sensoriale, la teoria dell'avvelenamento e la teoria dell'instabilità posturale. Occorre specificare come, laddove i fattori influenzanti siano noti, l'origine stessa della cybersickness sugli individui sia ancora incerta, e le contrapposizioni tra le precedenti teorie ne costituiscono un esempio. Infine, saranno elencate alcune modalità di misurazione, soggettive e oggettive, dei sintomi della VIMS, facendo leva sui pro e contro di ognuna di esse.

2.1 Sintomi e fattori influenzanti

I sintomi che costituiscono e si manifestano al presentarsi della cybersickness sono molteplici e di natura variegata, e la loro gravità presenta un legame differente con i vari fattori che possono presentarsi durante l'esperienza VR. Come osservato in diversi studi in questo ambito, tali sintomi generalmente includono [2]:

- affaticamento visivo;
- dolori alla testa ed emicranie;
- sudorazione eccessiva;
- disorientamento;
- sensazione di vertigine;
- nausea;
- dolori di stomaco;
- vomito;
- mancanza di coordinazione o perdita di equilibrio (o atassia).

Spesso, tuttavia, tali sintomi non sono considerati nella loro individualità, ma vengono invece suddivisi in tre categorie principali in base ad alcune caratteristiche che li accomunano e alla differente probabilità di comparsa durante l'esperienza dell'utente. Tali categorie sono riportate di seguito [12].

- Sintomi oculomotori: a questo primo gruppo appartengono i sintomi relativi al sistema visivo, ovvero affaticamento degli occhi, difficoltà di mettere a fuoco le immagini e relativa vista sfocata, e mal di testa.
- Sintomi di disorientamento: in questo insieme si ritrovano i sintomi quali vertigine, capogiri (*dizziness*) e atassia.
- Sintomi di nausea: a questo raggruppamento risultano invece associati sintomi affini a vomito, nausea, dolori di stomaco e salivazione e sudorazione eccessive.

Dal lavoro di Stanney et al. [15], inoltre, si evince come i tre gruppi di sintomi precedenti abbiamo rilevanze differenti in base alla natura dell'esperienza posta all'utente. È stato osservato, infatti, come l'intensità degli effetti negativi appartenenti a ciascuna categoria sia strettamente dipendente dalle caratteristiche dell'esperienza virtuale (o di simulazione) in cui l'utente risulta immerso: un'applicazione VR non definita, per esempio, potrebbe stimolare maggiormente il sistema visivo dell'utente rispetto al sistema vestibolare, generando in egli intensità maggiori nei sintomi oculomotori piuttosto che in quelli di disorientamento o nausea.

Come anticipato, tuttavia, l'entità della percezione dei sintomi precedenti varia principalmente a seconda delle caratteristiche dell'individuo e dell'equipaggiamento utilizzato per la VR. Tale condizione è dovuta alla presenza di alcuni fattori che influiscono direttamente, con pesi differenti, sull'esperienza dell'utente nel VE. Tali fattori possono essere suddivisi e identificati in tre gruppi principali [3], illustrati di seguito.

2.1.1 Fattori anagrafici e individuali

Questa prima tipologia di condizioni incidenti sull'esperienza VR include fattori quali l'età, il sesso, eventuali malattie ed esperienze pregresse riguardanti l'ambito della VR (e videogiochi).

In primo luogo, è stato osservato come la suscettibilità alla cybersickness abbia un picco negli individui nella fascia di età tra i 2 e i 12 anni, per poi decrescere rapidamente dai 12 anni in poi [4]; da tali risultati, pertanto, è possibile osservare che gli utenti di età più avanzata sono potenzialmente in grado di percepire sintomi di intensità minore [3] rispetto ai soggetti più giovani.

Inoltre, diversi studi hanno identificato come il sesso dell'individuo sia in grado di influenzare i sintomi percepiti. In particolare, gli utenti di genere femminile risultano, generalmente, più suscettibili al presentarsi dei sintomi durante l'immersione in scene virtuali rispetto alla controparte maschile. La causa di tale suscettibilità è stata identificata nel maggiore campo visivo posseduto dalle donne e dall'influenza degli ormoni su tali individui [2,4].

In aggiunta, la presenza di malesseri o malattie pregresse nell'individuo, quali ad esempio la mancanza di sonno, stress emotivo, febbre o affaticamento [5], può consistere in un'ulteriore

causa in grado di alterare la suscettibilità dell'utente, spesso incrementando l'entità dei sintomi percepiti [2].

Infine, un ruolo importante è rivestito dall'adattamento dell'utente al VE: la presenza e l'acquisizione di familiarità con la tecnologia VR è infatti in grado di ridurre il peso dei sintomi percepiti dai soggetti, consentendone, pertanto, un'esposizione prolungata nel VE prima dell'avvento dei primi sintomi [2,6].

2.1.2 Fattori dipendenti dai dispositivi hardware

In questo secondo raggruppamento rientrano tutti quei fattori relativi alle prestazioni e alle caratteristiche dei dispositivi hardware utilizzati per visualizzare e/o realizzare il VE. Caratteristiche quali il *lag*, il *flicker*, il *frame rate* e la frequenza di aggiornamento (*refresh rate*) dei display, la tipologia del display utilizzato, la tecnologia stessa in utilizzo (ad esempio, Head Mounted Display, o HMD, CAVE), e la relativa ergonomia, calibrazione e precisione del *tracking* dei movimenti dell'utente risultano fattori particolarmente influenti sull'esperienza virtuale.

Questa tipologia risulta pertanto strettamente legata alle prestazioni e alle qualità delle tecnologie utilizzate attualmente: l'incidenza dei fattori precedenti può essere, infatti, facilmente ridotta tramite l'impiego di dispositivi dalle prestazioni migliori, i quali verranno sviluppati con l'avanzare degli anni. In particolare, il miglioramento tecnologico dell'hardware per la VR deve vergere a ridurre, in primo luogo, i fattori di maggiore influenza tra i precedenti, ovvero il lag, il flicker e la precisione del tracking.

Il lag è definito come la differenza temporale tra un input fornito dall'utente e l'esecuzione e la visualizzazione dell'azione corrispondente nel VE. Esso dipende direttamente dalle prestazioni dell'hardware di calcolo utilizzato, in quanto da esse dipende la velocità nel processare le informazioni e renderle visibili all'utente. Maggiore sarà l'intervallo tra l'input e la visualizzazione da parte dall'utente, e di maggiore entità risulteranno il disagio percepito dall'utente e i relativi sintomi da esso causati [2, 7].

Con il termine flicker, invece, viene indicato il fenomeno consistente in un repentino cambiamento visivo della luminosità visualizzata sul display, che risulta in una percezione di instabilità delle immagini rappresentate. Questo fenomeno risulta molto fastidioso e spesso può causare affaticamento visivo, contribuendo ad una più facile crescita dei sintomi di cybersickness [2, 3, 8]. Tale problema è strettamente legato alla frequenza di aggiornamento dei display utilizzati: spesso, infatti, si presenta laddove il refresh dello schermo viene eseguito con frequenze ridotte (una frequenza pari a 30Hz risulta tuttavia già sufficiente per ridurre la maggior parte dei fenomeni di flicker [2]).

Inoltre, un ruolo di particolare importanza è rivestito dalla precisione del tracciamento del movimento dell'utente: idealmente, ad un movimento fisico del soggetto, deve corrispondere un uguale movimento visualizzato all'interno del VE. Tuttavia, l'accuratezza dei dispositivi di tracking non è mai assoluta, ma possono presentarsi errori, i quali devono essere ovviamente ridotti quanto più possibile: la mancata corrispondenza tra un'azione fisica e la sua visualizzazione nel VE risulta infatti una delle maggiori cause scatenanti in grado di incrementare i sintomi subiti dagli utenti (tra i quali, la sensazione di vertigine è la principale conseguenza [2]).

Infine, un fattore scatenante che risulta decisamente importante nell'induzione dei sintomi nell'utente è da ritrovarsi nel cosiddetto conflitto vergenza-accomodazione, o VAC. Esso avviene quando il cervello riceve informazioni contrastanti riguardanti la profondità delle immagini visualizzate. Nel mondo reale, le informazioni riguardanti la distanza dell'oggetto di interesse dagli occhi dell'utente (vergenza, o divergenza) e la distanza di messa a fuoco (accomodazione) risultano generalmente combacianti, e ciò consente all'individuo di mettere correttamente a fuoco l'immagine; questo non avviene tuttavia all'interno delle scene virtuali: nelle esperienze VR, laddove la profondità degli oggetti virtuali può variare, la distanza degli occhi dell'utente dall'immagine virtuale, ovvero la vergenza, rimane costante e fissata e pari alla distanza tra gli stessi occhi e i display dell'hardware VR utilizzato (ad esempio, HMD), fornendo quindi incompatibilità e incongruenze tra i due tipi di informazioni recepite dal cervello. La conseguenza principale di tale conflitto risulta quindi la comparsa di sintomi principalmente oculomotori, quali affaticamento visivo e mal di testa [21].

2.1.3 Fattori funzionali, relativi al software e ai task dell'utente VR

In questo ultimo gruppo rientrano, invece, tutti i fattori relativi alla realizzazione stessa del VE e agli obiettivi e task che l'utente deve compiere al suo interno. Il livello di controllo del soggetto all'interno del VE, la durata stessa dell'esposizione e della presenza dell'utente nell'applicazione VR e la complessità dei task richiesti all'individuo possono infatti alterare e variare la gravità dei sintomi [3].

Il livello di controllo riveste tra di essi il ruolo principale e l'influenza maggiore. Esso può dipendere dalla tipologia del sistema di navigazione implementato e dalla sua facilità di utilizzo: ad una modalità di navigazione più simile al movimento reale, corrisponderà sempre un maggiore livello di controllo e un maggiore senso di immersione. Il livello di controllo può inoltre dipendere dallo stesso task realizzato nell'applicazione VR: un utente a cui viene chiesto di guidare in prima persona un'automobile avrà un livello di controllo maggiore rispetto ad un altro utente che siederà come passeggero sull'automobile senza possibilità di gestirne i movimenti. Numerosi studi hanno dimostrato come un maggiore controllo da parte dell'utente sul VE causerà una suscettibilità molto minore ai sintomi della cybersickness [4].

Il grado di controllo e la durata dell'esperienza non sono tuttavia gli unici fattore funzionali, lato software, in grado di suscitare negli utenti i malesseri dovuti alla cybersickness. Le modalità in cui avvengono i movimenti all'interno del VE sono infatti estremamente importanti in quest'ottica: il numero di assi sui cui avvengono le rotazioni della visuale, la frequenza con cui avvengono le rotazioni della vista dell'utente virtuale, il *rate* in cui variano le accelerazioni lineari e rotazionali durante il moto, la velocità stessa in cui l'utente si muove durante l'esecuzione del task e l'altezza media mantenuta dal suolo virtuale sono tutti fattori in grado di influenzare in maniera significativa l'entità della sickness generata [50,51].

Vi sono, infine, altri fattori, non dipendenti dal movimento, in grado di suscitare la sickness. In particolare, la densità degli oggetti virtuali visualizzati nel campo visivo dell'utente, la fedeltà e il realismo delle texture e dei modelli virtuali [50,51] e la posizione mantenuta dall'utente

nel mondo reale durante l'esecuzione dell'applicativo virtuale (seduto o in piedi) [52] sono tutti elementi in grado di influire significativamente sull'intensità dei sintomi provata dagli utenti.

2.2 Cybersickness, motion sickness e simulator sickness

I sintomi della cybersickness possono, a primo impatto, risultare coincidenti con quelli che costituiscono la sintomatologia delle precedentemente note motion sickness e simulator sickness. Una migliore distinzione e consecutiva separazione della cybersickness dalle precedenti iniziò a diffondersi in parallelo alla crescita nell'utilizzo delle tecnologie di VR moderne, rese sempre più accessibili, grazie ad un costo sempre più basso, ad un numero sempre maggiore di utenti. Sebbene, inizialmente, a causa della similarità dei sintomi e degli effetti collaterali essa veniva confusa e considerata come una forma o una variazione della motion sickness, grazie ad alcuni studi e ricerche, tuttavia, fu osservato come, nonostante i sintomi risultassero tra loro similari, la loro gravità e la loro incidenza variassero in base al caso esaminato. Inoltre, anche le cause che portano al manifestarsi dei sintomi risultarono tra loro differenti: laddove, ad esempio, la motion sickness si presenta quando l'individuo si trova all'interno di un veicolo fisicamente in moto, e la simulator sickness si manifesta negli utenti durante l'utilizzo di simulatori di movimento, la cybersickness non necessita, invece, di alcun movimento reale per manifestarsi. In quest'ultimo caso, l'origine è da ritrovarsi nel movimento apparente percepito dall'utente, fenomeno noto come *vection* [2,9]. Tale termine indica, per l'appunto, l'illusione di movimento, causata dalla visualizzazione di uno stimolo visivo in moto, percepita da un osservatore fisico stazionario: l'utente, ad esempio, potrebbe trovarsi seduto su una sedia mentre, tramite l'HMD, vengono proiettate ai suoi occhi immagini in movimento per riprodurre il moto di un'automobile di cui è passeggero.

2.3 Cause e teorie sull'origine della cybersickness

Per meglio comprendere le cause per le quali il fenomeno della vection risulti così problematico, bisogna prima di tutto conoscere il funzionamento del sistema visivo e del sistema vestibolare umano. Questi due sistemi costituiscono i componenti principali attraverso i quali il corpo umano acquisisce e intuisce informazioni riguardanti il movimento.

In particolare, il sistema vestibolare fornisce informazioni riguardanti il moto (ovvero eventuali accelerazioni) e l'orientamento della testa all'interno dello spazio in riferimento ai tre assi cartesiani [2], consentendo di identificare direzioni quali avanti, indietro, su, giù, destra e sinistra. Il sistema visivo, invece, fornisce indizi acquisiti dalla visualizzazione stessa dello spazio circostante il soggetto; tali indizi visivi possono contribuire a generare nell'individuo, in determinate condizioni, l'impressione di moto anche nel caso di soggetti stazionari (quindi, la vection).

Nel caso in cui il soggetto sia effettivamente in movimento, le informazioni acquisite dai sistemi visivo e vestibolare sono generalmente coincidenti; tuttavia, nel caso di movimenti visivamente indotti, queste informazioni sono divergenti. Su questi dati si basa una delle teorie più sostenute tra quelle che si impongono l'obiettivo di indentificare tutte le cause che portano al manifestarsi dei sintomi della VIMS, conosciuta come "Teoria del conflitto sensoriale" [2].

Insieme alla "Teoria dell'avvelenamento" e alla "Teoria dell'instabilità posturale", tale teoria costituisce una delle tre teorie principali riguardanti la cybersickness.

2.3.1 Teoria del conflitto sensoriale

Questa prima teoria è la più datata e la maggiormente accettata tra le tre; la sua formulazione è dovuta a Reason e Brand [10].

Alla base della teoria del conflitto sensoriale vi sono le divergenze tra le informazioni fornite al cervello umano dal sistema vestibolare e da quello visivo: il conflitto tra l'orientamento e l'accelerazione del soggetto indicato dal primo generano un conflitto con la sensazione di moto visivamente indotta dalle immagini acquisite dal secondo [2,3]. Quando il soggetto non ottiene la risposta aspettata, quindi, emerge un conflitto sensoriale e si possono presentare i sintomi di cybersickness.

Sebbene questa teoria sia la più diffusa, non è tuttavia perfetta, e presenta alcuni problemi, come specifica LaViola Jr. [2]. In primo luogo, il potere predittivo di tale teoria riguardo a quando si presenteranno i sintomi, o a quanto essi siano severi, risulta notevolmente ridotto; inoltre, essa non spiega come, a parità di stimoli, non tutti gli individui subiscano gli stessi sintomi; infine, non fornisce alcuna spiegazione di come tale conflitto causi malesseri negli individui, limitandosi solamente ad indicarlo come la causa principale.

2.3.2 Teoria dell'avvelenamento

La teoria dell'avvelenamento basa le sue fondamenta sull'idea che il cervello umano recepisca le informazioni riguardanti il conflitto sensoriale come una forma di reazione ad un "veleno" o sostanza estranea [2, 3]: è stato osservato, in particolare, come i sintomi della sickness risultino molto simili agli effetti delle neurotossine sul corpo umano [56, 57]. Il corpo, pertanto, reagisce tramite i sintomi, come la nausea e il vomito, attuando un meccanismo evolutivo di difesa con lo scopo di eliminare ed espellere questo ipotetico veleno, i cui effetti consistono nei conflitti sensoriali percepiti dal soggetto.

Il principale difetto di questa seconda teoria consiste, tuttavia, nel fatto che essa non sia in grado di fornire una spiegazione ai sintomi differenti da nausea e vomito e alle reazioni differenti tra i vari soggetti a parità di stimoli forniti all'interno del VE.

2.3.3 Teoria dell'instabilità posturale

L'ultima teoria che prova a fornire una spiegazione delle cause della cybersickness, formulata in origine da Riccio e Stoffregen [2], si basa sull'idea che l'obiettivo primario del corpo umano sia quelli di mantenere la stabilità posturale in ogni ambiente in cui esso si trovi immerso [3] e a cui quindi il soggetto cercherà di adattarsi per evitare di perdere l'equilibrio. In un esempio di LaViola [2], la stabilità posturale viene associata al fenomeno per il quale un individuo camminerà in modo differente in base al fatto che esso si trovi sull'asfalto asciutto o su una lastra di ghiaccio: il corpo varierà il suo modo di camminare in modo tale da mantenere l'equilibrio il più possibile [2]; in tale caso il corpo si adatta gradualmente all'ambiente per mantenere la stabilità. Quando, però, l'ambiente in cui è immerso l'utente varia in maniera brusca e

significativa, il corpo non riesce ad abituarsi in tempo a questo cambiamento e la stabilità viene persa causando quindi instabilità posturale.

La durata prolungata dello stato di instabilità viene riconosciuta, in questa teoria, come la causa fondamentale che porta al presentarsi della cybersickness: ad una maggiore durata, risulta quindi più probabile il presentarsi dei sintomi e maggiore la loro gravità.

La formulazione di questa teoria nacque con l'obiettivo di fornire un'alternativa alla teoria del conflitto sensoriale, specificando come il conflitto sensoriale non potesse essere in alcun modo la causa di cybersickness e motion sickness [11]: secondo gli autori, quando il sistema visivo e vestibolare forniscono informazioni combacianti, tali informazioni sono tra loro ridondanti; pertanto, in caso di divergenza, essi forniscono dati non ridondanti, che non conducono obbligatoriamente al presentarsi dei sintomi di sickness, e la teoria del conflitto sensoriale non fornisce alcuna motivazione a riguardo [2].

La validità di quest'ultima teoria non è ancora del tutto accertata, ma, nonostante ciò, ha fornito evidenze significative sull'inadeguatezza della teoria del conflitto sensoriale.

2.4 Misure della cybersickness

La misurazione dell'entità dei sintomi della VIMS è un processo complicato, a causa delle molteplici variabili, quali la diversità tra i singoli utenti e le differenti tecnologie utilizzate, che rendono oggettivamente problematica la realizzazione di misure assolutamente affidabili.

Esistono due tipologie essenziali di misure della cybersickness percepita dagli utenti: le misure soggettive e le misure oggettive.

2.4.1 Misure soggettive

Le misure soggettive del *discomfort* provato dagli utenti immersi nel VE risultano attualmente quelle più ampiamente diffuse nella quasi totalità degli studi riguardanti la VR.

Queste misure consistono in questionari, di differenti nature e significati, i quali vengono posti all'utente in differenti momenti dell'esperienza virtuale; l'utente compila tali questionari in autonomia, rispondendo, ad esempio, a semplici domande riguardanti argomenti quali esperienze pregresse con la VR e, principalmente, ai sintomi percepiti nell'esperienza virtuale esaminata, fornendo generalmente un'indicazione dell'entità percepita di tali sintomi su una scala numerica predeterminata.

Nei primi studi riguardanti gli effetti indesiderati della sickness sugli utenti, il questionario maggiormente diffuso risultava essere il Pensacola Motion Sickness Questionnaire [12, 55], il quale, come si evince facilmente dal nome stesso, era nato originariamente come metodo di misurazione dei sintomi riguardanti la motion sickness. Con il maggiore sviluppo delle tecnologie di simulazione, vennero apportate molteplici modifiche a tale questionario, finché, a seguito di studi improntati all'analisi dei sintomi della simulator sickness, venne ideato un questionario alternativo noto come Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) [12], il quale risulta, ancora oggi, quello maggiormente diffuso anche in ambito VR.

Laddove il primo questionario identificava 27 sintomi riguardanti la motion sickness, il SSQ ne distingue 16, suddivisi nelle tre categorie di sintomi oculomotori, di disorientamento e di nausea [12], ai quali l'utente sotto esame deve fornire una valutazione su una scala tra 0 e 3 in base alla gravità percepita, associando un valore alto ad una maggiore intensità avvertita e, rispettivamente, un valore basso ai sintomi più lievi [13]. Se il valore complessivo registrato nel questionario, definito Total Severity, risulta superiore a 20 punti, si può allora dire che il partecipante ha subito un elevato livello di disagio durante l'esperienza VR [14, 44, 45].

Generalmente, il SSQ viene posto al termine dell'esperienza virtuale in modo da registrare i sintomi percepiti durante la stessa. Tuttavia, spesso i valori di fine esperienza vengono messi in relazione con valori registrati prima dell'immersione nel VE, tramite un SSQ pre-esperienza, in modo da valutare solamente le variazioni nella gravità percepita dei vari sintomi, considerando quindi la condizione iniziale dei singoli utenti.

Ponendo le proprie fondamenta sul SSQ, molti altri questionari sono stati sviluppati negli anni per registrare e valutare fattori differenti della sickness [12,13], oppure per considerare elementi non ancora inclusi, quali, ad esempio, il disinteresse, la stanchezza e la noia provati durante l'esperienza (elementi valutati nel Motion Sickness Assessment Questionnaire, o MSAQ) e la suscettibilità dei singoli individui ai sintomi della sickness (identificata da risposte riguardanti l'esperienza dell'utente con la sickness in età giovanile e adulta nel questionario pre-esperienza noto come Motion sickness Susceptibility Questionnaire, o MSSQ [16]).

Una variante dell'SSQ emersa negli ultimi anni, nota come French SSQ, o più brevemente F-SSQ, è il culmine di differenti studi volti a dimostrare l'inefficacia dell'SSQ, e in primo luogo del suo metodo di *scoring* dei sintomi e della suddivisione di essi nelle tre classi di nausea, oculomotori e di disorientamento. Tali studi pongono infatti l'attenzione sul fatto che alcuni sintomi, nel questionario originale, possono appartenere a più di una categoria, pesando quindi due volte nel conteggio del punteggio totale, dando di fatto maggiore importanza e significatività ad alcuni sintomi a discapito di altri [47,53]. Bouchard et al. [47] hanno dimostrato inoltre, come anticipato, che la suddivisione dei sintomi in tre categorie, come attuata nell'SSQ, non risulti adatta alla descrizione della sintomatologia della cybersickess, essendo originata da studi relativi alla sickness provata da utenti posti in simulatori fisici, proponendo invece, nell'F-SSQ, una suddivisione più consistente dei sintomi in due sole categorie, nausea e oculomotori, escludendo la categoria di disorientamento, ritenuta poco rilevante in ambito VR a partire dai risultati ottenuti dai test da loro effettuati, e associando ai sintomi al più una categoria di appartenenza, evitando così di considerarne alcuni due volte nel conteggio dello *score* finale [47]. Attualmente l'F-SSQ, pertanto, risulta il questionario soggettivo in grado di spiegare e adattarsi meglio ai sintomi della sickness generata dagli applicativi VR.

Esistono, inoltre, altri questionari, quali il Virtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ) e il Cybersickness Questionnaire (CSQ) consistenti in varianti dell'SSQ in grado di fornire misure improntate, come nel caso dell'F-SSQ, all'ambito delle esperienze VR [17], ma la cui diffusione e adozione risultano attualmente decisamente ridotte.

Un problema fondamentale dei questionari precedenti è che, generalmente, essi necessitano di essere posti prima o dopo l'esperienza virtuale, non riflettendo correttamente la situazione della sickness in tempo reale. Con lo scopo di arginare questa difficoltà, altri questionari sono stati realizzati con l'idea di essere posti durante l'esperienza virtuale del

partecipante, a cadenza temporale regolare, in modo da identificare gradualmente l'entità dei sintomi. Essi sono necessariamente di natura più semplice e concisa rispetto ai precedenti, consistendo generalmente in una domanda a cui si può rispondere in maniera celere, in modo da non influire troppo sull'immersione dell'individuo. Di questa tipologia sono il Fast Motion Sickness Scale (FMS), per il quale l'utente deve, ad intervalli regolari di un minuto, valutare la gravità dei sintomi fornendone una valutazione in una scala numerica tra 0 e 20, e il Misery Scale (MISC) o Discomfort Scale (DS), molto simile al FMS, ma con una scala tra 0 e 10 [13].

2.4.2 Misure oggettive

Una valida alternativa alle misure soggettive consiste nelle cosiddette misure oggettive, o fisiologiche, della cybersickness. Tali misure vengono utilizzate con lo scopo principale di superare i limiti delle misure soggettive, quale ad esempio la difficoltà di ottenere risultati in tempo reale durante l'esperienza, oppure integrandone i risultati con i dati ottenuti dai vari questionari posti agli utenti.

Tali misure, differentemente dalle precedenti, necessitano di strumentazione esterna utile per registrare variazioni in tempo reale dello stato psicofisico dell'individuo durante l'esperienza VR [13]. In particolare, misurazioni essenziali per comprendere l'entità dei sintomi dell'utente consistono, in ordine di diffusione, nella valutazione delle oscillazioni posturali (o *postural sway*) del partecipante rispetto alla posizione del suo centro di pressione, nella valutazione delle variazioni dell'elettrocardiogramma (ECG), dell'elettroglottogramma (EGG) e dell'elettroencefalogramma (EEG) [13,18], nei valori della risposta galvanica della pelle (GSR) [19], nei cambiamenti della dimensione delle pupille e altre misure relative agli occhi [13,19] e, infine, nei dati ricavati dalla misurazione del battito cardiaco e della variabilità della frequenza cardiaca (*heart rate*, o, HR ed *heart rate variability*, o HRV, rispettivamente) [20].

I dati ottenuti dagli esami oggettivi costituiscono un valido strumento per osservare e stimare la comparsa dei sintomi della VIMS, risultando fortemente correlati con i valori riportati dagli utenti stessi nei questionari soggettivi [13]. Come specificato in precedenza, inoltre, un grosso vantaggio nell'utilizzo di queste misure consiste nella possibilità di ottenere dati in tempo reale registrati durante l'immersione dell'utente nel VE, che invece risulterebbero difficili da ricavare con misurazioni soggettive. Tuttavia, nonostante tali misure risultino dettagliate e precise, la strumentazione utilizzata per effettuarle risulta spesso troppo intrusiva, guastando il senso di presenza e di immersione dell'individuo nel VE. Infine, un ulteriore svantaggio delle misure fisiologiche consiste nella maggiore complessità di analisi dei risultati ottenuti e, generalmente, in un maggiore costo dovuto all'equipaggiamento esterno necessario [3].

3.Stato dell'arte

In questo capitolo sarà trattato lo stato dell'arte delle tecniche di mitigazione volte a ridurre e, ipoteticamente, eliminare ove possibile il presentarsi degli effetti negativi della cybersickness. Le tecniche qui presentare risultano quelle di maggiore diffusione e adozione nelle applicazioni odierne. L'attenzione sarà inoltre posta sui pro e i contro e sulla difficoltà di applicare le varie tecniche agli applicativi VR più generaci, a causa delle caratteristiche intrinseche e alle limitazioni delle singole soluzioni proposte.

3.1 Introduzione

Negli anni, numerose tecniche sono state proposte, in differenti lavori e pubblicazioni, con il fine di mitigare quanto più possibile gli effetti indesiderati dovuti a motion sickness, simulator sickness e cybersickness. Tali tecniche possono essere considerate come appartenenti ad alcuni macro-gruppi, distinti in base alla tipologia di soluzione identificata. I gruppi in cui possono essere suddivise tali tecniche sono i seguenti:

- Tecniche basate sulla modifica del *Field Of View* (FOV);
- Tecniche con applicazione di *Blur* al VE;
- Tecniche incentrate sull'utilizzo dei cosiddetti *Rest frame*;
- Tecniche che sfruttano il riposizionamento del *view-point*;
- Tecniche che si basano su modifiche dell'*Optical flow* nella scena;
- Tecniche di alterazione della geometria del VE;
- Tecniche con sfocatura della scena basata sul *Depth of Field* (DOF);
- Tecniche realizzate tramite l'utilizzo di hardware esterni.

A queste singole tecniche, possono aggiungersi eventuali soluzioni ibride, ovvero combinazioni di altre tecniche in grado, pertanto, di trarre elementi caratteristici da due o più macro-gruppi, con lo scopo di ottenere migliori risultati sull'utente.

In seguito, lo stato dell'arte delle tecniche di mitigazione viene presentato trattando approfonditamente singole soluzioni appartenenti ai differenti gruppi identificati.

3.2 Field Of View (FOV)

Detto anche campo visivo, il *Field Of View* FOV definisce la porzione della scena virtuale (o reale) visibile in un dato momento al sistema visivo dell'utente.

Insieme ad altri fattori (quale, ad esempio, l'optical flow), il FOV contribuisce direttamente a determinare l'intensità e la durata nel tempo dell'illusione di vection: essa consiste nell'illusione di movimento, causata dalla visualizzazione di uno stimolo visivo in moto, in un osservatore fisico stazionario [2]. Tale illusione fornisce un contributo rilevante nel fenomeno della cybersickness, la cui entità aumenta al crescere delle dimensioni del FOV, come osservato da van Emmerik [23].

Una riduzione statica del FOV, spesso attuata tramite l'applicazione di una vignettatura nera ai frame (Fig. 3.1-a) con lo scopo di nascondere il contenuto del VE presente nella periferia del campo visivo dell'utente, pertanto, permetterebbe di diminuire la sickness, ma al prezzo di una riduzione del senso di presenza nella scena virtuale: l'utente, infatti, sarà in grado di visualizzare solamente una porzione del VE (nella direzione a lui frontale), mentre tutto il resto risulterà nascosto e non visibile, differentemente da quanto avviene invece nel mondo reale.

Alternativamente alla riduzione statica, alcuni lavori e pubblicazioni si incentrano invece su tecniche di riduzione dinamica del FOV/vignettatura nei frame acquisiti [24,25], o Dynamic FOV; tale riduzione viene pilotata dalla velocità traslazionale e/o rotazionale dell'utente: in questo modo, in situazioni di stazionarietà, la riduzione del FOV è minima, mantenendo elevato il senso di presenza, laddove in situazioni in cui l'utente risulti in movimento interviene, invece, una riduzione maggiore del campo visivo, consentendo di diminuire gli effetti di sickness e permettendo una maggiore durata dell'esperienza VR per i singoli utenti.

(a) (b)

Figura 3.1: a) Vignettatura [24]; b) Circle effect [26]

Questa prima alternativa è spesso utilizzata nei videogiochi, in quanto la sua efficacia è nota. Tuttavia, nel lavoro di Fernandes e Feiner [24] si è osservato come, nonostante per tutti gli utenti la sensazione di sickness sia stata effettivamente mitigata, la riduzione del FOV durante l'esecuzione dell'applicativo è risultata impercettibile solo per la metà degli utenti che hanno effettuato il test.

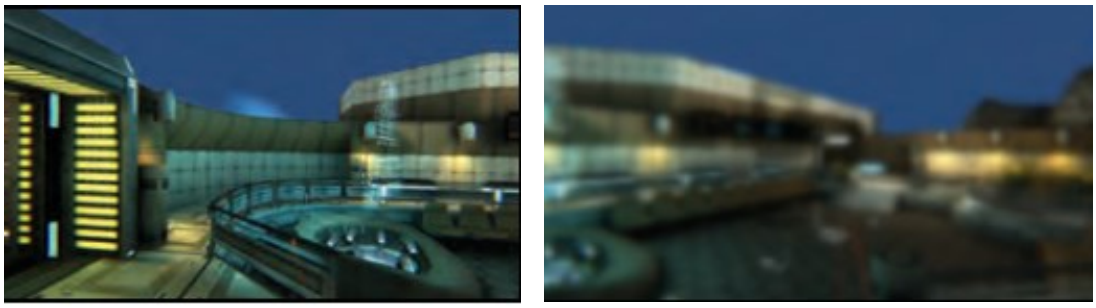
Diversamente, negli esperimenti attuati da Norouzi et al. [25], la vignettatura proposta, pilotata da accelerazione e velocità rotazionale dell'utente ha portato invece ad una maggiore sensazione di cybersickness per gli utenti di test.

Un'ulteriore tecnica alternativa a quelle precedentemente citate, consiste nel Circle effect [26]: in tale soluzione, simile al Dynamic FOV, la vignettatura nera viene sostituita da immagini statiche realizzate a partire da punto di vista di una camera differente, in moto all'interno del VE virtuale in maniera coerente all'utente (Fig. 3.1-b). Il contributo di questa camera aggiuntiva viene aggiornato ad intervalli regolari di alcuni secondi, in base alla posizione e rotazione dell'utente in tale istante temporale, garantendo una migliore uniformità, in termine di contenuti e colori, con

ciò che è visualizzato all'interno del suo campo visivo. Questa tecnica costituisce un'alternativa meno percettibile rispetto alla vignettatura nera, ma la visione periferica risulta tuttavia riempita di informazioni non utili, sebbene percettivamente simili a quelle contenute al centro del frame.

3.3 Blur

Negli studi condotti da Riecke [27], viene mostrato come scene virtuali fotorealistiche siano la causa di una maggiore sensazione di vection, laddove versioni più astratte degli stessi ambienti contribuiscano in minor modo a questa sensazione.



(a) (b)

Figura 3.2: a) Rotational Dynamic Gaussian Blur con utente stazionario; b) Rotational Dynamic Gaussian Blur durante una rotazione [28]

La riduzione della vection, che, di conseguenza, causa una minore entità della sickness percepita, è ciò a cui ambiscono le tecniche che sfruttano l'applicazione del *Blur*: Applicare uno o più tipologie di sfocatura al VE visualizzato permette di ottenerne una visione più "astratta", meno fotorealistica, e pertanto meno impattante sull'intensità dei sintomi percepita dall'utente.

Una prima tipologia di tecnica [28] appartenente a questo gruppo consiste nell'applicazione di sfocatura sui frame visualizzati durante i movimenti rotazionali dell'utente (Rotational Dynamic Gaussian Blur); tali frame vengono sfocati interamente tramite una sfocatura Gaussiana uniforme (Fig. 3.2-b), la cui intensità è resa direttamente dipendente dall'accelerazione dell'utente, e viene applicata soltanto al superamento di una soglia di velocità rotazionale: in assenza di rotazioni, pertanto, la sfocatura non viene applicata (Fig. 3.2-a), non tenendo quindi conto della velocità di traslazione (assunta costante in [28]). I benefici dell'utilizzo di questa tecnica non sono tuttavia assoluti: solo la metà degli utenti presi in esame dal suo autore ha osservato un miglioramento sulla sensazione di sickness percepita, mentre per altri tale sensazione è risultata, contrariamente, incrementata. Inoltre, l'applicazione della sfocatura al frame intero non consente di distinguere dettagli durante il movimento, limitando l'esperienza VR.

In alternativa alla sfocatura dei frame nella loro interezza, un'altra tecnica nota come Saliency-Based Dynamic Gaussian Blur [29], permette di sfocare varie parti dei singoli frame, mantenendo a fuoco solo gli elementi salienti in essi presenti (Fig. 3.3-a), i quali vengono identificati tramite l'utilizzo di un algoritmo di deep learning. La distinzione tra elementi salienti e non salienti pone le sue basi su studi neurofisiologici della percezione visiva, i quali identificano due differenti modalità della retina, la modalità focale e la modalità ambientale, che consistono in due modi diversi in cui il cervello elabora le informazioni spaziali.

L'algoritmo di deep learning implementato permette, a differenza delle tecniche incentrate sull'alterazione del FOV, di mettere a fuoco non più un punto fisso (il centro del frame), ma un punto quindi dinamico la cui posizione viene predetta, ottenendo quindi una sfocatura dinamica in real-time della scena visualizzata. Nonostante l'algoritmo di *saliency detection* non garantisca una predizione sempre accurata del punto messo a fuoco dagli occhi dell'utente, a causa della sua difficoltà nel riconoscere elementi salienti non facilmente distinguibili dal background, tale

(a) (b)

Figura 3.3: a) Elemento saliente messo a fuoco dall'algoritmo di saliency detection [29]; b) Elemento saliente (barile giallo) riconosciuto tramite Dynamic Color-Based Gaussian Blur [30]

tecnica consente, tuttavia, di ottenere buoni risultati soprattutto in scene di movimento ad alte velocità (quali, a titolo di esempio, corse automobilistiche). L'implementazione di tecnologie di *eye-tracking* [29] nei visori permetterebbe quindi di identificare con maggiore precisione il punto di vista dell'utente, rendendo più semplice l'identificazione degli elementi salienti nella scena virtuale.

La complessità dell'implementazione della tecnica precedente, dovuta inoltre alla non disponibilità dell'algoritmo utilizzato, ha avuto come conseguenza la realizzazione di tecniche di saliency detection dall'utilizzo e dalla realizzazione più semplici. Una di queste alternative semplificate può essere identificata nella tecnica di Dynamic Color-Based Gaussian Blur. Proposta nel pacchetto software di GingerVR [30], tale tecnica pone la sua attenzione sulla saliency detection, realizzata tuttavia senza sfruttare alcun algoritmo di deep learning. Essa consiste nell'applicazione una sfocatura Gaussiana uniforme in maniera dinamica all'intero frame, in intensità dipendente dalla velocità del movimento dell'utente, mantenendo tuttavia a fuoco elementi salienti del VE, riconosciuti tramite il confronto del colore dei singoli pixel con opportune soglie di colore, impostate sui singoli canali del modello RGB (Fig. 3.3-b). Sebbene questa soluzione risulti semplice da implementare, richiede tuttavia che la scena VR sia posta in

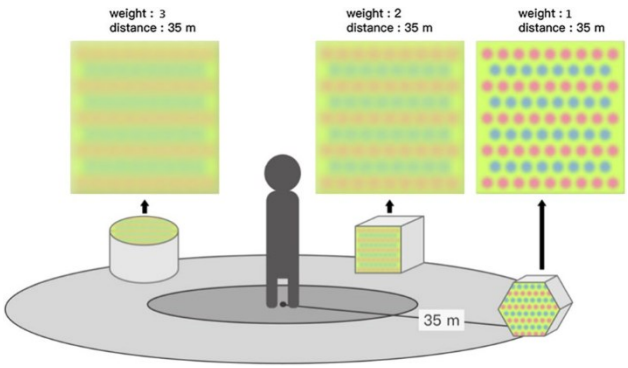


Figura 3.4: Texture Blur [41]

opportune condizioni, con oggetti salienti realizzati con colori molto diversi rispetto al resto della

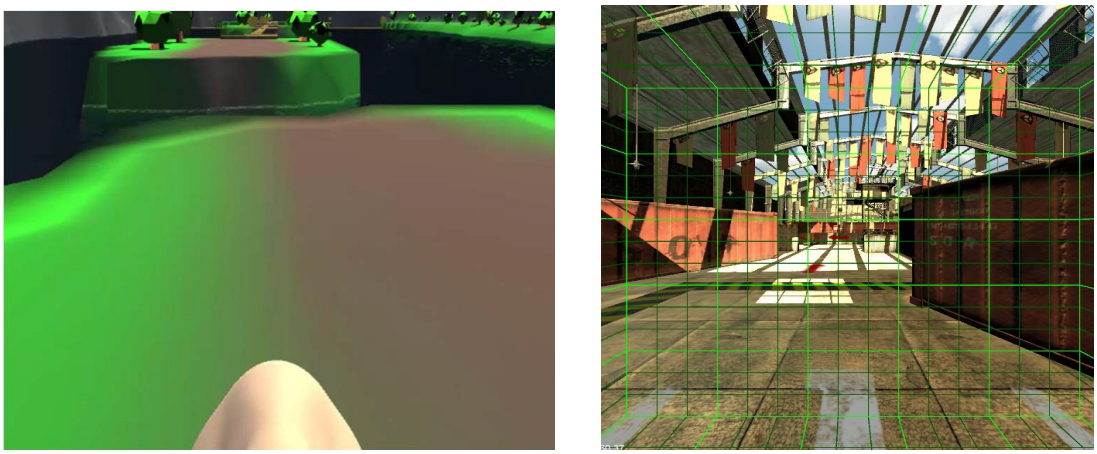
scena, in modo da essere posti in risalto. Questa tecnica risulta, pertanto, difficile da generalizzare e da utilizzare in scene virtuali variegate nei colori e nei contenuti.

Un'ulteriore tecnica basata sul blur, nota come Texture Blur [41], si differenzia dalle soluzioni precedenti per la modalità di applicazione della sfocatura al VE visualizzato. Laddove, precedentemente, il blur veniva renderizzato direttamente sull'immagine generata dalla camera virtuale, in questa soluzione, proposta da Chen et al. [41], la sfocatura risulta invece applicata direttamente sulla texture degli oggetti virtuali, con l'obiettivo principale di simulare il punto di vista dell'utente, senza tecnologie di eye-tracking, e la profondità di campo (DOF) degli occhi dell'utente. Per effettuare ciò, ai singoli oggetti virtuali viene associato un peso arbitrario che ne definisce l'importanza all'interno del VE e condizionata dal task, distinguendo in elementi principali o ambientali (ovvero, elementi di secondaria importanza). Da tale parametro, W, e dalla distanza dell'oggetto dalla camera dell'utente, dipende pertanto l'intensità della sfocatura applicata agli elementi virtuali: a parità di distanza, due oggetti con pesi diversi risulteranno quindi sfocati in maniera differente, dovuta all'importanza ad essi associata, mantenendo a fuoco gli oggetti principali (Fig. 3.4). I risultati ottenuti da Chen evidenziano come, grazie a questa modalità di applicazione del blur, l'attenzione degli individui viene posta maggiormente sugli oggetti virtuali di primaria importanza, riducendo in tale modo l'affaticamento visivo dell'utente. Tale tecnica risulta pertanto una valida soluzione per mitigare i sintomi della sickness; tuttavia, la scelta dei pesi ottimali per dipende dai singoli scenari virtuali e può risultare complessa.

3.4 Rest frame

L'utilizzo di *rest frame* è una pratica sfruttata per ridurre in intensità gli effetti della cybersickness sugli utenti VR, introducendo elementi nel VE volti a questo obiettivo. Tali elementi consistono in porzioni del VE che rimangono fisse, in relazione all'osservatore, durante l'esperienza VR [31].

Diversi studi suggeriscono che il sistema nervoso umano utilizza rest frame variegati, dei quali almeno uno viene utilizzato per ottenere informazioni spaziali, quali orientamento e posizione durante l'immersione e il moto all'interno del VE [32]. La presenza di questi riferimenti stabili nella scena virtuale consente, pertanto, di effettuare esperienze VR di maggiore durata



(a) (b)

Figura 3.5: a) Virtual Nose [32]; b) Virtual Cave [33]

prima di subire gli effetti della cybersickness [31].

Una prima tecnica basata sull'idea dei rest frame consiste nel cosiddetto Virtual Nose [32]: il modello 3D (Fig. 3.5-a) di un naso viene agganciato alla camera, centrata tra i due occhi, con lo scopo di fornire all'utente un rest frame familiare ritrovabile nel mondo reale. Si tratta di una soluzione semplice da implementare, generalmente poco intrusiva per gli utenti e in grado di ridurre gli effetti della sickness, sebbene soltanto in piccola parte.

Altri modelli possono essere usati come rest frame: versioni differenti del naso, come l'Authentic Nose proposto in GingerVR [30], oppure maschere, cockpit in caso di scenari di guida [33], etc.

Un'ulteriore tipologia di rest frame è invece quella definita Virtual Cave [33]: in questa tecnica alternativa, di fronte alla vista dell'utente viene posta una griglia virtuale realizzata tramite un cubo *wireframe* posto intorno al player nella scena virtuale (Fig. 3.5-b), che svolge quindi il ruolo di rest frame; spesso le dimensioni e l'orientamento di questa griglia sono impostate in modo tale da ricordare la stanza e i muri che circondano l'utente nel mondo reale, consentendogli di avvertire in minore entità eventuali perdite di orientamento, permettendogli facilmente di riallinearsi e orientarsi nel mondo reale durante la simulazione virtuale. Questa alternativa risulta tuttavia più invasiva rispetto alle precedenti, e può inoltre risultare ridondante e confusionaria laddove il visore VR utilizzato sfrutti già tecnologie simili, quali ad esempio il Guardian System di Oculus o il Chaperone di Valve.

3.5 View-point repositioning

Le tecniche appartenenti a questa tipologia si basano sulla ricalibrazione della camera virtuale in seguito a movimenti di traslazione e rotazione dell'utente.

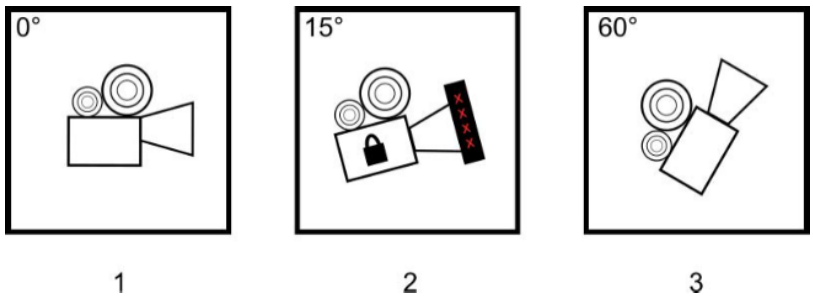


Figura 3.6: Vision Snapper [30]

Una prima tecnica, definita Vision Snapper o HeadSnapper [30, 34], consiste nell'impostazione di una soglia sulla velocità del movimento dell'utente e di conseguenza della camera associata, che ne definisce la visuale: quanto l'utente realizza un movimento con velocità superiore a questa soglia, sull'immagine visualizzata dalla camera viene realizzato un *fade-in* a nero, la camera viene riposizionata secondo un angolo predeterminato e infine viene realizzato un *fade-out* permettendo all'utente di visionare il VE dalla nuova angolazione. L'utilizzo del fade-in a nero, nonostante oscuri interamente l'ambiente visualizzato, permette all'utente di non subire gli effetti fastidiosi di rotazioni della visuale a velocità elevate, che causerebbero facilmente sensazione di cybersickness. Questa soluzione risulta tuttavia suggerita per rotazioni della visuale di utenti stazionari, che non si muovono all'interno della scena, in quanto risulterebbe decisamente invasiva in applicazioni in cui sono richiesti movimenti e traslazioni più frequenti e più frenetiche.

Un'alternativa alla tecnica precedente consiste invece nella tecnica di VisionLock/HeadLock [30, 33]: si tratta di una tecnica di locomozione incentrata sulle rotazioni

della visuale dell'utente, che può essere integrata con altre tecniche di movimento traslazionale. In questa tecnica, l'attenzione è quindi posta nuovamente sulle rotazioni della visuale, identificate in

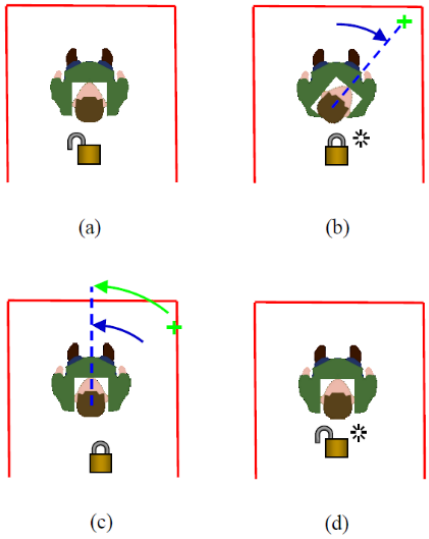


Figura 3.7: Vision Lock [33]

numerosi studi come una delle cause principali di sickness per gli utenti.

Il VisionLock funziona nel seguente modo: l'utente che desidera ruotare il suo punto di vista chiude uno dei due occhi (che deve essere necessariamente tracciato dall'HMD secondo questa realizzazione) (Fig. 3.7-a); a questo punto, il mondo virtuale è bloccato e il suo movimento è posto in relazione alla direzione di vista dell'utente. L'utente ruota quindi la testa mantenendo l'occhio chiuso, ed il VE ruota, di conseguenza, nello stesso modo (Fig. 3.7-b): durante tale rotazione, l'immagine visualizzata risulta fissa per l'altro occhio, il quale è aperto, permettendo quindi di aggirare gli effetti negativi della rotazione della visuale. Infine, l'utente riporta la direzione di vista al centro, riposizionando la testa in posizione di riposo (Fig. 3.7-c), e riapre l'occhio precedentemente chiuso, visualizzando correttamente il punto d'interesse (Fig. 3.7-d) [33].

Questa tecnica, tuttavia, necessita di tecnologie di eye-tracking nell'HMD utilizzato, e quindi non risulta facilmente generalizzabile, se non tramite la sostituzione della chiusura dell'occhio tramite, ad esempio, la pressione di un pulsante apposito, risultando tuttavia deleterio per l'immersione. Inoltre, il VisionLock risulta difficilmente integrabile nella moltitudine di applicazioni e scenari VR, nei quali richiederebbe numerose modifiche alle modalità di locomozione implementate, modificando quindi in maniera notevole l'esperienza fruita dagli utenti a causa della sua elevata intrusività.

3.6 Optical flow

Un altro fattore rilevante nell'illusione di vection avvertita dall'utente è l'*optical flow*, o flusso ottico, e in particolare quello percepito dalla visione periferica, il quale causa una sensazione di movimento apparente degli oggetti lontani dal centro di vista. La compensazione di questo flusso periferico consente di ottenere benefici in termini di riduzione di sickness percepita.

Una tecnica importante in questo ambito, nota come Dot Effect [26], si pone l'obiettivo di neutralizzare la sensazione di movimento apparente (vection), istanziando punti artificiali ("dots"), organizzati in una griglia di dimensioni arbitrarie circostante l'utente, visualizzati con velocità *2v* nella direzione di movimento, essendo *v* la velocità dell'utente in tale direzione [26,30].

Figura 3.8: Dot Effect [26]

Questi punti risultano pertanto anch'essi in movimento, rispetto all'utente, con velocità relativa *v* e l'ambiente circostante appare esso stesso in movimento, con velocità relativa *-v*.

Il contributo totale di questi due moti relativi si azzera, bilanciando così, teoricamente, il flusso ottico percepito dalla visione periferica [26].

Questa tecnica risulta tuttavia molto intrusiva, e non consente di ottenere differenze significative in termini di cybersickness [26].

3.7 Alterazione della geometria del VE

La cybersickness, come si è osservato precedentemente, è dovuta, insieme ad altri fattori, alla percezione di movimento dovuta agli stimoli visivi, forniti all'utente durante l'esperienza nel VE.

Una tecnica emergente, proposta da R. Lou [35, 36], si pone il fine di diminuire gli effetti deleteri della sickness attuando una riduzione del senso di moto indotto dagli stimoli visivi presenti nell'area periferica del FOV, realizzata tramite l'applicazione di deformazioni geometriche della scena virtuale circostante all'utente durante la navigazione [36].

In assenza di feedback per gli altri sensi, la percezione del mondo virtuale avviene solamente tramite la vista: in tali condizioni, Lou [36] assume, nel realizzare la sua tecnica di mitigazione, che la fonte principale di sickness sia il movimento relativo degli oggetti nella zona laterale del campo visivo umano. La tecnica proposta, tuttavia, differentemente dalle soluzioni precedenti, non attua alcuna riduzione del FOV, non modifica i parametri di navigazione (quali velocità, accelerazione e traiettoria), e non applica blur, mantenendo quindi livelli di immersione elevati.

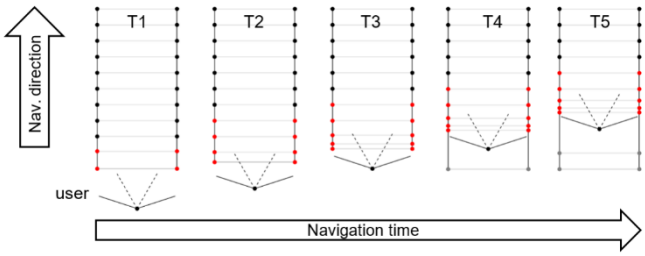


Figura 3.9: Deformazione geometrica del VE [36]

Tale approccio parte dall'identificazione di tre tipologie di parti del VE che vengono visualizzate dall'utente durante la navigazione: quelle visualizzate nell'area centrale del FOV, le parti nella zona laterale del FOV e, infine, quelle esterne al campo visivo. La direzione di vista coincide con la direzione della navigazione: questo risulta essere un primo limite presente in questa soluzione.

Come osservabile nella Figura 3.9, durante la navigazione dell'utente, qui indicata tramite cinque istanti temporali (T1-T5), il VE viene deformato in modo da "comprimere" la geometria degli oggetti presenti nella periferia del campo visivo (indicati da punti rossi nell'immagine), in modo tale da farli sembrare in movimento, nella stessa direzione dell'utente, ma con velocità minore rispetto all'area centrale del suo FOV: questa soluzione, come verificato dagli esperimenti attuati dall'autore, consente di ridurre la sensazione di moto apparente degli oggetti presenti nella zona laterale del campo visivo, diminuendo di conseguenza la sickness percepita. Quanto tali oggetti escono dal campo visivo (ora identificati da punti grigi), vengono riportati alla loro posizione iniziale.

La necessità di deformare in contemporanea molte *mesh*, eventualmente tra loro disconnesse, ha reso necessario l'utilizzo di metodi di deformazione basati sullo sfruttamento delle cosiddette *Cage* (o *Lattice*), i cui vertici, identificati con colore nero, rosso o grigio, vengono

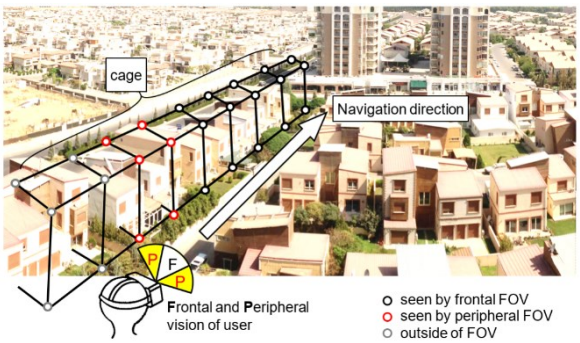


Figura 3.10: Visualizzazione di Cage nella zona periferica del FOV [36]

modificati ugualmente a quanto viene illustrato nella Figura 3.10: a partire dalle molteplici mesh, si realizza un *bounding box* globale che le contiene, con il fine di realizzare lattice di dimensioni regolari; i vertici di questi lattice vengono così utilizzati come punti di controllo per le deformazioni, le quali avvengono in maniera uniforme, relativamente alla direzione di navigazione e alla distanza dell'utente.

Le sperimentazioni condotte da Lou [36] dimostrano come, tramite l'utilizzo di questa tecnica, la qualità di navigazione e il grado di immersione dell'utente non subiscono modifiche o effetti negativi, mentre la sensazione di cybersickness percepita dagli utenti risulta invece, generalmente, diminuita. Tuttavia, come precedentemente anticipato, in questa implementazione non vengono considerati movimenti avanzati, composti da eventuali traslazioni e rotazioni,

rendendo, pertanto, questa soluzione valida solo per casi specifici e quindi difficilmente generalizzabile.

3.8 Depth of Field (DoF)

Un ulteriore importante effetto in grado di indurre cybersickness negli utenti VR consiste nel cosiddetto conflitto Vergenza-Accomodazione. Se, nel mondo reale, il sistema visivo umano attua questi due processi in sinergia, permettendo una corretta messa a fuoco dei singoli oggetti, questo tuttavia non avviene durante l'utilizzo di un HMD: in tale situazione, laddove la vergenza varia in corrispondenza dell'oggetto virtuale di interesse (l'oggetto che l'utente desidera mettere a fuoco), l'accomodazione rimane tuttavia fissa, a causa della distanza costante presente tra gli

Figura 3.11: Gaze-Contingent Depth Of Field con effetto bokeh applicato al centro dell'immagine [37]

occhi dell'utente e i singoli display del visore.

Una soluzione in grado di aggirare parzialmente questo conflitto, permettendo quindi di ridurre il Visual Discomfort, consiste nella tecnica nota come Gaze-Contingent Depth of Field [37]: in essa, un effetto di *bokeh blur* viene applicato al VE, mantenendo a fuoco soltanto gli elementi in primo piano. Questi vengono selezionati da un algoritmo DoF apposito tra gli oggetti situati all'interno di un circolo di confusione, posto a sua volta al centro dello schermo: tale semplificazione risulta necessaria al fine di non utilizzare meccanismi di eye-tracking disponibili solo per alcuni visori.

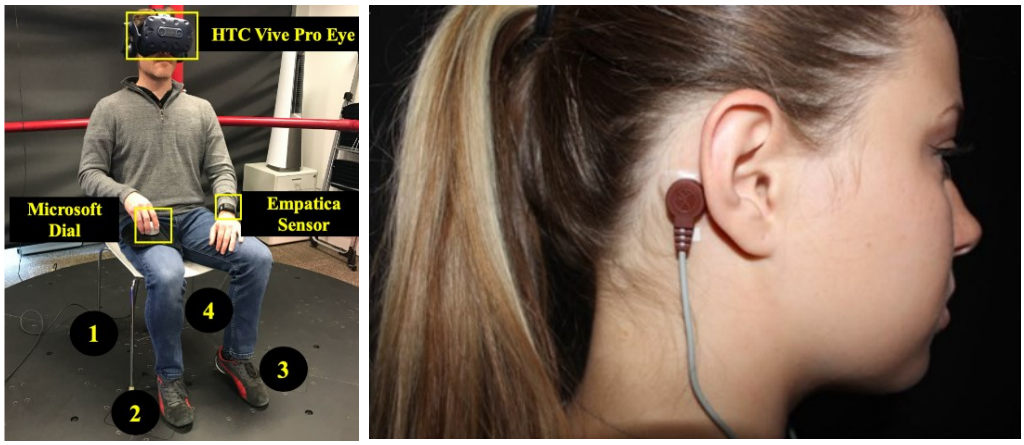
La profondità visiva, e pertanto il punto messo a fuoco, non vengono ricalcolati con continuità, ma ad intervalli di 500ms, in quanto l'occhio umano necessita di tale intervallo temporale per il *refocus*. L'effetto introdotto permette all'utente, pertanto, una migliore distinzione delle diverse profondità a cui sono situati gli elementi del VE, fornendo un *depth cue* simile a quello presente nel mondo reale: più un oggetto risulta distante dall'elemento messo a fuoco, più risulta forte il blur ad esso applicato. Come si può evincere dai risultati ottenuti dalle sperimentazioni di K. Carnegie et al. [37], l'adozione di questa tecnica ha consentito una riduzione della sensazione di cybersickness subita dagli utenti di test. Tuttavia, a causa della semplificazione adottata, per mettere a fuoco oggetti differenti risulta necessario portarli al centro del display ruotando opportunamente la testa in tale direzione: non è, pertanto, sufficiente ruotare semplicemente gli occhi nella direzione interessata, e ciò riduce quindi il senso di immersione percepito.

3.9 Hardware esterni

A differenza delle citate nei paragrafi precedenti, le quali prendono in considerazione differenti tipologie di mitigazioni a livello software, vi sono inoltre soluzioni incentrate sui risultati ottenibili sugli utenti tramite utilizzo di hardware appositi. L'uso di tali hardware consente di fornire all'utente VR degli stimoli vestibolari altrimenti non ottenibili dalla scena virtuale stessa, consentendo di attenuare i conflitti tra ciò che viene percepito dal sistema visivo e quanto viene registrato dal sistema vestibolare stesso.

Nelle sperimentazioni di Jung et al. [38], ad esempio, l'utilizzo di una pedana vibrante (Fig. 3.12-a) associata ad un'esperienza di guida virtuale ha permesso di ridurre l'entità della cybersickness, fornendo agli utenti un feedback tattile difficile da ottenere tramite l'uso del solo visore. L'intensità delle vibrazioni generate dalla pedana, controllata tramite un computer, è tale da corrispondere e combaciare il più possibile con quanto visionato nel VE in un dato istante temporale.

I risultati ottenuti da Jung et al. Mostrano chiaramente come l'utilizzo di questo apparato abbia permesso di ridurre significativamente la sickness per gli utenti, senza inficiare in alcun modo l'immersione e il senso di presenza all'interno del VE.



(a) (b)

Figura 3.12: Soluzioni hardware: pedana vibrante (a)[38] e Stimolazione vestibolare galvanica (GVS) tramite elettrodi (b) [39]

Una soluzione più articolata consiste, invece, nell'applicazione di vibrazioni direttamente sull'apparato vestibolare o nella stimolazione vestibolare galvanica (*galvanic vestibular stimulation*, GVS), con il fine di fornire stimoli vestibolari assenti nella scena virtuale.

Negli studi condotti da Weech et al. [39], la stimolazione galvanica è stata realizzata tramite alcuni elettrodi, posti appositamente dietro le orecchie degli utenti (Fig 3.12-b), che forniscono una corrente galvanica di lieve intensità ($\pm$ 1750 μA) per tutta la durata dell'esperienza virtuale. Secondo i risultati dei test, gli utenti che hanno ricevuto la stimolazione galvanica hanno percepito sintomi di cybersickness con minore entità rispetto agli utenti privi di stimolazione GVS.

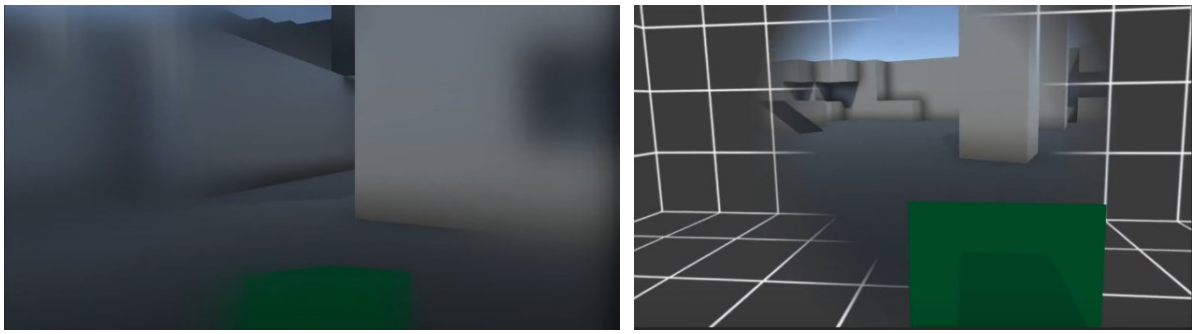
L'utilizzo di hardware esterno, pertanto, consente di ottenere ottimi risultati in termini di mitigazione; tuttavia, tali soluzioni possono risultare invasive o limitanti per i movimenti, possono essere non facilmente accolte dall'utenza (non tutti sarebbero disposti, ad esempio, a subire stimolazioni galvaniche dirette) e consistono in una spesa aggiuntiva, non sempre possibile, rispetto ai singoli visori per la VR.

3.10 Soluzioni ibride

Un esempio di soluzione ibrida può essere identificato nella tecnica nota come VR Tunneling [40]: tale approccio prende spunto dalle soluzioni basate su riduzione del FOV del player e da quelle basate sulla sfocatura della scena visualizzata.

Questa tecnica, presente sull'asset store di Unity con il nome di VR Tunneling PRO, propone un approccio simile al sopracitato Circle Effect, mantenendo informazioni di contenuto e di colore nelle zone periferiche, ma invece di sfruttare una seconda camera, utilizza la camera dell'utente, il cui contributo visivo nella periferia del FOV viene sfocato, riducendo il movimento percepito in queste zone del VE (Fig. 3.13-a).

Alternativamente alla sfocatura, gli sviluppatori hanno inoltre realizzato una soluzione basata sull'utilizzo di immagini statiche nella periferia del campo visivo dell'utente, realizzate tramite una griglia (*cage*) di supporto che funge da rest frame (Fig. 3.13-b).



(a) (b)

Figura 3.13: VR Tunneling con sfocatura periferica (a) e VR Tunneling con Cage (b) [40]

4.Realizzazione e procedura sperimentale

Come illustrato nei precedenti capitoli, la natura del fenomeno della cybersickness ha portato alla realizzazione, nel corso degli anni, di numerose tecniche software, e talvolta hardware, volte a mitigare gli effetti negativi riscontrati dagli utenti durante esposizioni prolungate in scene virtuali. Tali tecniche, tuttavia, non sempre si impongono di risolvere, o meglio ridurre, l'entità dei sintomi causati da esperienze VR generiche: spesso, infatti, consistono in soluzioni per problemi e scenari specifici (come, ad esempio, le tecniche di View-point repositioning, difficilmente applicabili in scenari diversi da quello di origine [34]), o necessitano di condizioni particolari per un corretto funzionamento (ad esempio, tecniche come Saliency detection e color blur [30]).

Alcune tra le tecniche precedenti, pertanto, potrebbero comportarsi in maniera ottimale nell'ambiente di utilizzo originale, ma non ugualmente bene in altri scenari. Risulta pertanto necessario uno strumento che permetta di confrontare le singole soluzioni, hardware o software che siano, utilizzando una gamma diversificata di scenari, in modo tale da valutarne l'efficacia in un ambito generalizzato.

In vista di tale obiettivo, nel corso di questa tesi è stato realizzato, tramite il software Unity, uno strumento software utilizzabile come testbed. Esso consiste in quattro scenari realizzati con lo scopo di replicare e riassumere gli elementi più diffusi e comuni nelle odierne applicazioni VR, e di generare negli utenti sintomi di cybersickness di differenti entità (non trascurabili). In particolare, tali scenari sono realizzati in modo tale da presentare differenze intrinseche in quelli che nei precedenti capitoli sono stati definiti "fattori funzionali e software"; in base all'entità di questi fattori, è possibile quindi predire un andamento, in termini di intensità di sickness suscitata negli utenti, di tutti gli scenari, catalogandoli e classificandoli pertanto in base all'intensità della cybersickness generata.

Inoltre, i risultati ottenuti dai test effettuati su tale strumento (presentati nel capitolo successivo) possono essere utilizzati come base per un confronto, laddove i test sugli utenti vengano eseguiti in primo luogo senza l'utilizzo di alcuna tecnica di mitigazione (una sorta di *baseline*), e in seguito ripetuti applicando una tra le soluzioni precedenti oppure una nuova tecnica.

Lo scopo principe di questa tesi è, tuttavia, la realizzazione di uno strumento in grado di generare differenti intensità della sickness VR sugli utenti a partire dagli scenari costituiti da

diversi fattori funzionali. Il confronto tra le singole tecniche di mitigazione ipotizzato potrà essere la base per studi futuri.

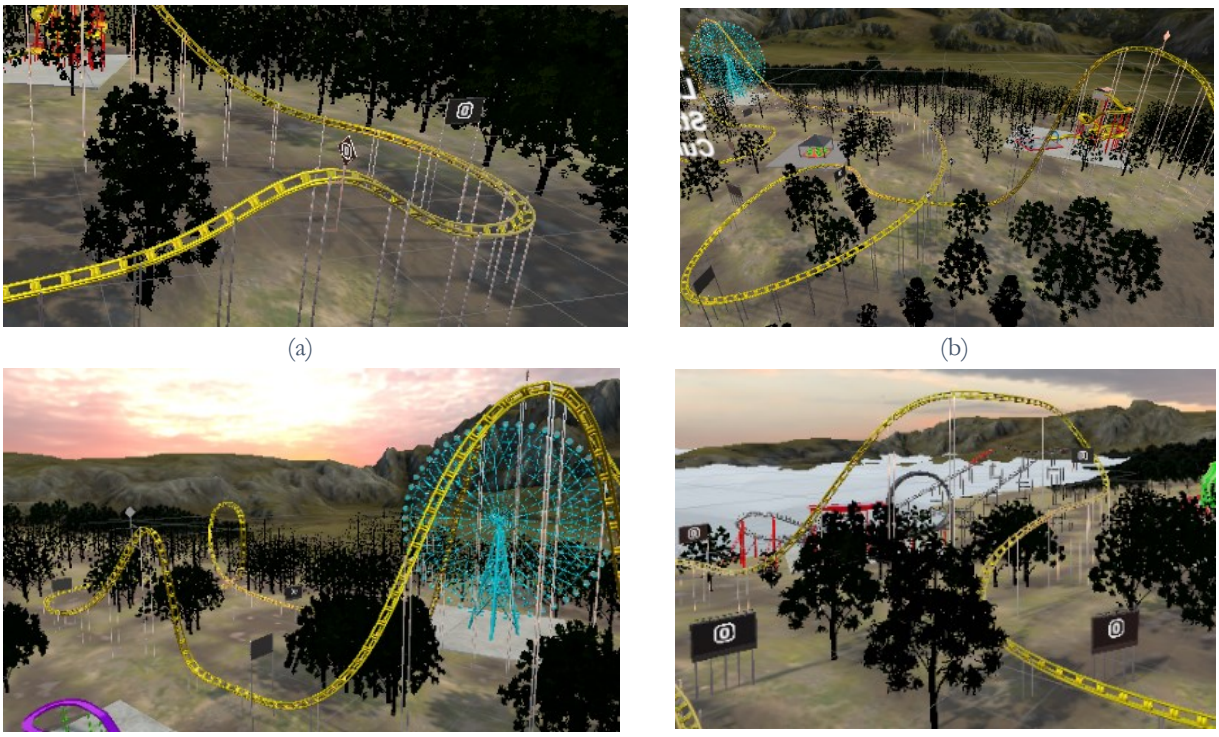
In questo capitolo, in particolare, verranno trattati nel dettaglio i singoli scenari, in termini di caratteristiche fondamentali, obiettivi che l'utente deve raggiungere durante l'esperienza e utilità ad essi associate. Infine, viene spiegata nel dettaglio la procedura seguita per effettuare i test sugli utenti, la strumentazione e la composizione stessa degli utenti volontari.

4.1 Rollercoaster – Uncontrolled follow path

4.1.1 Design

Questo primo scenario di test consiste in un parco divertimenti virtuale; l'utente si trova fin dall'inizio dell'esperienza all'interno di un carrello inizialmente fermo sulle rotaie delle montagne russe.

L'attrazione è stata realizzata in modo tale da presentare una "difficoltà" che gradualmente aumenta lungo il percorso: nel tratto iniziale sono presenti una breve salita, un altrettanto breve discesa e una curva con un raggio moderatamente ampio (Fig. 4.1-a); a seguire, due salite e due discese molto ripide, intervallate da un'ampia e lunga curva (Fig. 4.1-b); vi sono poi un cosiddetto "giro della morte" (in cui l'utente visualizza, per un breve periodo, il VE come se si trovasse capovolto), seguito da una curva stretta, da una rapida successione di salite e discese ripide (Fig. 4.1-c) seguite, infine, da un tratto percorso a testa in giù e da un lungo avvitamento che riporta l'utente nella posizione iniziale (Fig. 4.1-d) (per iniziare il giro successivo).



(a) (b)

(c) (d)

Figura 4.1: a) Tratto iniziale del Rollercoaster, b) Tratto intermedio, c) "Giro della morte" e salite ripide, d) Tratto finale con avvitamenti

Durante l'esperienza virtuale, l'utente può ruotare liberamente la testa, in modo da cambiare la vista all'interno del VE, e può regolare la velocità di movimento del carrello (in un intervallo compreso tra una velocità minima e una velocità massima predefinite). L'utente non può fermare il movimento del carrello, e, chiaramente, non ne può variare la direzione di moto. L'esperienza associata viene quindi definita "Uncontrolled Follow Path", in quanto l'utente, durante l'immersione nel VE, ricopre il ruolo di un passeggero senza possibilità di controllare i movimenti (pertanto, "uncontrolled"), che avvengono lungo un tragitto predefinito (realizzato grazie all'asset "Bezier Path Creator" di Unity [64]), secondo un task noto come "follow path"

Lungo il percorso, sono situati inoltre alcuni cartelloni, di dimensioni, posizioni e orientamenti differenti, che forniscono indicazioni necessarie per svolgere correttamente uno dei task richiesti in questo scenario.

Infine, sono presenti feedback sonori relativi al moto del carrello e al corretto svolgimento dei task (spiegati nel dettaglio nel paragrafo successivo).

4.1.2 Task

In questo primo scenario, l'utente deve svolgere correttamente due task principali: in primo luogo, deve completare nel minor tempo possibile l'intero tragitto, composto da otto giri completi. Per fare ciò, deve regolare la propria velocità di movimento utilizzando i tasti associati sui due controller, aumentandola o diminuendola entro i limiti consentiti.

Inoltre, come anticipato nel paragrafo precedente, l'utente deve premere una corretta sequenza di tasti, diversa per ogni giro, visualizzati uno alla volta sopra i cartelloni presenti lungo il tragitto. I cartelloni, originariamente di colore nero, si illuminano uno alla volta, seguendo la sequenza, divenendo di colore blu e indicando al centro il tasto da premere per eseguire il task. Per immergere maggiormente l'utente, ad una pressione corretta nella sequenza il cartellone associato si illumina di verde ed emette un suono che ne identifica la correttezza, laddove una pressione errata illumina il cartellone di rosso indicando l'errore.

Per semplificare l'esperienza, i pulsanti da premere consistono nel *left trigger*, identificato sui cartelloni dalla scritta "L", e nel *right trigger*, identificato da "R" (Fig. 4.2), dei due controller fisici, in modo tale che risultino facilmente individuabili e utilizzabili anche da utenti meno esperti.

Ne consegue che, per un corretto svolgimento del test, l'utente deve percorrere il circuito nel minor tempo possibile, effettuando tuttavia il minor numero possibile di errori nella sequenza di pressioni dei pulsanti.

Figura 4.2: cartellone della sequenza ("R")

4.1.3 Misura delle prestazioni

Il tempo impiegato per completare l'esperienza t_c (o il tempo fino alla terminazione prematura) viene registrato e messo in relazione ad un tempo minimo (T_{min} , tempo di completamento alla massima velocità consentita) e ad un tempo massimo (T_{max}, rispettivamente, a velocità minima consentita), fornendo un risultato compreso nell'intervallo [0,1], che costituisce la misura di Operation Speed dello scenario, *OS,* secondo la formula:

$$OS = 1 - \frac{t_c - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Inoltre, viene calcolato anche un valore di Accuracy, A, compreso sempre nell'intervallo [0,1], basato sulla corretta pressione dei pulsanti nella sequenza visualizzata fino all'istante di terminazione:

$$A = \frac{p_c}{C}$$

Essendo p_c le pressioni effettuate correttamente dall'utente nella sequenza visualizzata (fino all'istante di terminazione), e *C* il totale dei cartelloni presenti nella sequenza fino al momento della terminazione.

È infine calcolata, a titolo indicativo, la velocità di movimento media mantenuta dall'utente nel corso di tutta la durata della sua esperienza, pari al rapporto tra la distanza percorsa e il tempo di completamento, e il numero di giri completati.

4.1.4 Utilità

L'utilità di questo scenario è insita nelle condizioni "estreme" che l'utente si trova ad affrontare durante un'esperienza di guida di un veicolo, in moto in un ambiente nel quale sono situati elementi ornamentali e dettagli a distanza moderata dall'utente (pertanto, non nelle sue immediate prossimità).

In particolare, durante i singoli giri sulle montagne russe, il partecipante si trova nelle vesti di un passeggero, ruolo che gli conferisce un controllo minimo sul moto a cui viene sottoposto, il quale è composto da movimenti e rotazioni a velocità elevate lungo tutti e tre gli assi cartesiani, tratti di salita e discesa molto ripidi e tratti a testa in giù, realizzati appositamente per generare un conflitto non trascurabile tra le informazioni ricevute dal suo sistema visivo e da quello vestibolare.

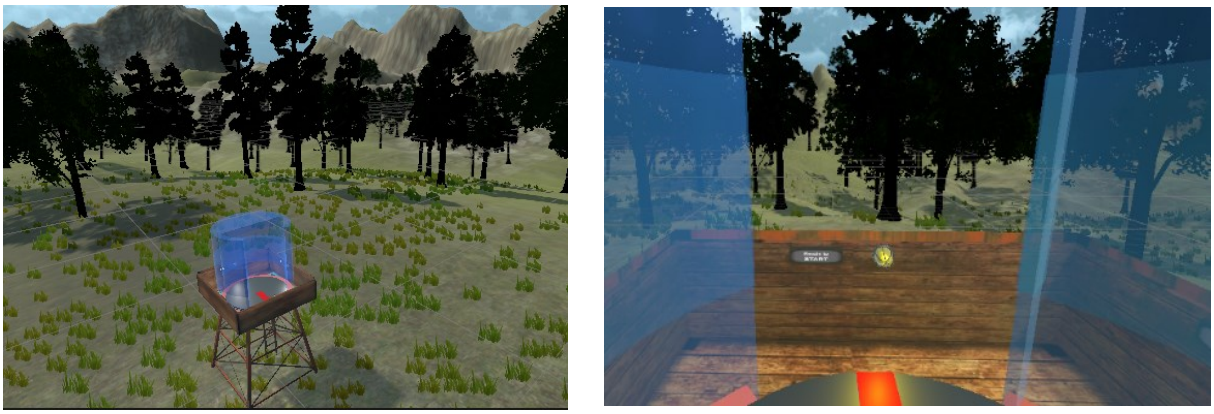
Inoltre, la scelta di colori accesi applicati agli elementi principali dello scenario (carrello, rotaie, cartelli) e l'utilizzo di modelli dettagliati all'interno del VE hanno l'obiettivo di incrementare l'intensità dei sintomi percepiti dai partecipanti, aumentando lo stress visivo tramite la presenza di colori forti e un discreto livello di fotorealismo nell'ambiente circostante l'utente [28].

Tale scenario risulta, infine, molto diffuso nelle applicazioni VR ed è, pertanto, spesso utilizzato per generare e valutare gli effetti della cybersickness sugli utenti [58, 59].

4.2 Tower defense – Shooter

4.2.1 Design

L'ambiente che compone questo scenario consiste in un ambiente naturale, in cui sono presenti numerosi alberi, erba, colline nelle prossimità dell'utente, raggruppati, da una parte, in una fitta boscaglia e, dall'altra, in un campo più aperto; inoltre, si trovano montagne a distanze più elevate che ne identificano i confini (Fig. 4.3-a).



(a) (b)

Figura 4.3: a) torre e porzione di ambiente naturale circostante; b) visuale dell'utente in gioco sull'ambiente, sulla pedana e i muri di vetro

Al centro di questo territorio è situata una torre di guardia, alta 4-5 m, sul quale è situata una pedana rotante circondata da un muro di vetro, che ne copre tre lati su quattro, lasciando una sola apertura frontale (Fig. 4.3). L'utente è situato su tale piattaforma, e quindi, all'interno dei suoi muri, e può ruotarla, sollevarla o abbassarla in maniera arbitraria, a patto che la sua direzione di vista non sia indirizzata verso uno dei muri: ciò significa che egli può muovere la piattaforma soltanto quando sta guardando frontalmente il buco tra i muri della piattaforma; rispettata tale condizione, l'utente può quindi ruotare la piattaforma sfruttando i tasti associati sui controller. Egli può comunque muoversi liberamente all'interno di queste mura: spostandosi fisicamente nel mondo reale, i suoi movimenti vengono tracciati e riportati nel VE.

All'interno dei quattro muri che compongono il confine della torre sono posti alcuni oggetti virtuali, ripetuti per ogni muro, che hanno la finalità di aiutare l'utente nell'eseguire correttamente il task associato. Essi consistono, in particolare, in un orologio-timer digitale che segna in tempo reale l'avanzamento temporale dei singoli round e degli istanti di intermezzo, e in quattro lanterne luminose che segnalano, tramite un codice a colori, l'avvicinamento dei nemici al lato della torre su cui si trovano (Fig. 4.3-b): una lanterna gialla indica un intermezzo prima o durante i round, una lanterna verde indica che da quella direzione non si stanno avvicinando i nemici, mentre una lanterna magenta o rossa lampeggiante indica che da quel lato della torre sono presenti nemici rispettivamente a distanze moderate o nelle immediate prossimità.

Inoltre, l'utente deve utilizzare un'arma virtuale (Fig. 4.4), posizionata nella sua mano dominante, per completare i task associati allo scenario di test, il quale, in base a tale caratteristica,

può essere definito uno "Shooter", ovvero un'esperienza in cui è richiesto all'utente di usare un'arma virtuale per abbattere alcuni bersagli. Tale arma consiste in una pistola semiautomatica (spara quindi un colpo per singola pressione del grilletto del controller), la quale, in caso di un numero eccessivo di azioni ripetute in un intervallo temporale contenuto, si "surriscalda" e necessita di alcuni secondi per poter sparare nuovamente. Sui lati di questa pistola sono infine posti alcuni indicatori utili per l'utente, per visualizzare il proprio andamento riguardo i task assegnati e, principalmente, per visionare facilmente lo stato di surriscaldamento dell'arma, che viene indicato una fiamma di colore inizialmente verde, che diventa a mano a mano rossa in base allo stato di surriscaldamento dell'arma. Sull'estremità opposta della pistola è invece presente un raggio laser di colore rosso che svolge l'obiettivo di facilitare la mira per l'utente; inoltre, tale

Figura 4.4: arma virtuale; visibili indicazioni su precisione, stato di gioco (vittoria, sconfitta, pareggio), punteggio e surriscaldamento dell'arma

raggio laser risulta acceso e visibile solo quando l'arma risulta in grado di fare fuoco, mentre è spento, ad esempio, nell'intervallo di tempo in cui bisogna attendere che l'arma ritorni funzionante dopo il surriscaldamento, fornendo quindi un ulteriore aiuto all'utente per comprendere meglio ciò che accade durante lo svolgimento del task.

L'esperienza associata a questo scenario è composta da due round, di cinque minuti ciascuno, all'interno dei quali l'utente deve abbattere alcuni bersagli in movimento: essi sono visualizzati con colori semplici e accesi in modo da risultare facilmente individuabili. In entrambi i round i bersagli, realizzati sotto forma di robot, vengono istanziati uno alla volta in punti della mappa distanti dall'utente, ad intervalli di tempo progressivamente minori, e si muovono verso il proprio obiettivo con velocità che aumentano gradualmente con il passare del tempo.

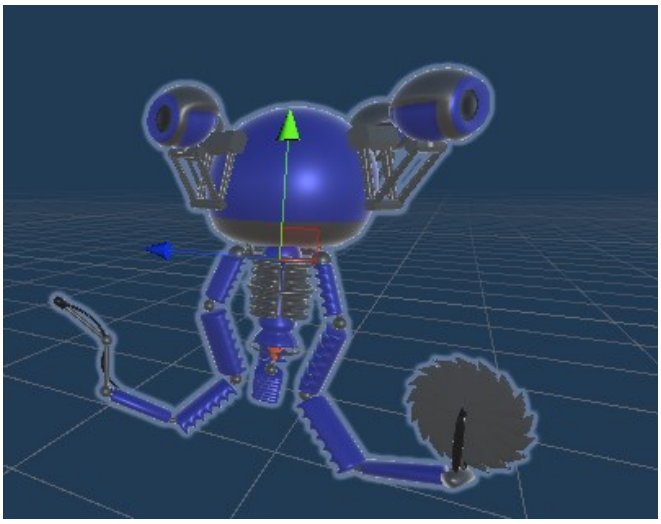
Infine, sono presenti diversi feedback sonori relativi al funzionamento dell'arma, alla comparsa dei nemici nell'ambiente e al loro movimento (si tratta di suoni direzionali che consentono all'utente di identificare la direzione da cui provengono), e alla loro eliminazione o al raggiungimento del loro obiettivo. L'eliminazione o il raggiungimento dell'obiettivo di un bersaglio sono, infine, accompagnati da un feedback visivo consistente in un effetto particellare, simile ad un fuoco d'artificio, rispettivamente di colore verde o rosso.

4.2.2 Task

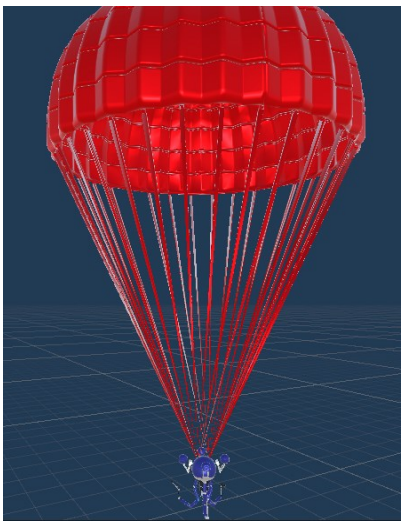
Come anticipato nel paragrafo precedente, il partecipante al test ha l'obiettivo di completare due round della durata di cinque minuti ciascuno, nei quali deve abbattere il maggior numero possibile di nemici, prima che essi raggiungano il proprio obiettivo.

In particolare, nel corso del primo round un'orda di nemici, in movimento sul suolo (Fig. 4.5-a), si approccia alla torre, con velocità di movimento e in numero progressivamente crescente, raggiungendola da punti differenti posti lungo un angolo di 360° attorno ad essa: l'obiettivo dell'utente è pertanto quello di abbattere tali bersagli, con l'arma equipaggiata nel VE, prima che raggiungano la sua posizione.

Durante il secondo round, l'obiettivo dell'utente risulta coerente con il precedente; tuttavia, i nemici sono misti: essi non si muovono unicamente sul suolo (come nel round precedente), ma provengono anche dal cielo (Fig. 4.5-b). I bersagli appartenenti a questa seconda tipologia, visualizzati come robot equipaggiati di paracadute, si muovono anch'essi con velocità progressivamente incrementata nel tempo, ma hanno come obiettivo il raggiungimento del suolo. Per abbatterli, l'utente deve colpire, con un proiettile, il paracadute, prima che essi raggiungano il terreno.



(a)



(b)

Figura 4.5: bersagli terreni (a) e bersagli volanti (b)

L'utente deve quindi colpire ed eliminare il maggior numero possibile di bersagli prima che essi raggiungano gli obiettivi a loro associati; per ogni nemico abbattuto, l'utente ottiene un punto, laddove ogni bersaglio che raggiunge il proprio obiettivo fa guadagnare un punto ai nemici. L'obiettivo principale dell'utente consiste quindi nel vincere, ottenendo un quantitativo di punti superiore a quelli ottenuti dai nemici.

Infine, al partecipante è anche richiesto di colpire i nemici con quanta più precisione possibile, ovvero utilizzando il minor numero possibile di proiettili per abbattere i singoli nemici.

4.2.3 Misura delle prestazioni

Il numero di nemici che riescono, nelle due fasi, a raggiungere il proprio obiettivo (identificato da n_r), viene registrato e messo in relazione al numero totale di nemici comparsi

nella scena fino all'istante di terminazione (N_t); tale valore viene utilizzato come metrica di valutazione, misurando l'Error proneness, E, per il singolo utente, che corrisponde ad un numero reale compreso nell'intervallo [0,1] calcolato secondo la seguente formula:

$$E = \frac{n_r}{N_t}$$

Inoltre, il rapporto tra il totale dei colpi esplosi dall'utente (*bullet fired,* b_f) viene registrato e messo in rapporto al numero totale di nemici abbattuti nei due round (*bullet hit,* b_h), ricordando che ogni nemico richiede un solo colpo a segno per essere eliminato, fornendo così la metrica di Accuracy, A, indice della precisione degli spari del partecipante:

$$A = \frac{b_h}{b_f}$$

Tale misura risulta anch'essa compresa nell'intervallo reale [0,1].

4.2.4 Utilità

L'utilità di questo scenario è da ritrovarsi nella possibilità di valutare gli effetti della sickness in uno scenario frenetico in cui l'utente, all'interno di un ambiente relativamente ristretto in cui i suoi movimenti sono limitati (la torre), risulta costretto ad effettuare rotazioni repentine della visuale, sia lungo l'asse orizzontale (nemici terreni), sia lungo l'asse verticale (nemici volanti). È noto infatti che, tra tutte le forme di movimento, la rotazione della visuale dell'utente è la tipologia in grado di causare più facilmente la cybersickness [28].

Inoltre, sebbene l'ambiente circostante risulti semplice, gli oggetti virtuali che compongono la scena, quali in primo luogo alberi, torre, terreno e montagne, presentano dettagli di entità moderata, in modo tale da incrementare ove possibile il fotorealismo dei singoli elementi virtuali e, soprattutto, aumentare il flusso ottico percepito dall'utente durante il movimento rotazionale, permettendo così di ottenere, ipoteticamente, maggiori livelli di sickness per l'utente [26,28,41].

Pertanto, l'implementazione di questo secondo scenario risulta utile per unire le caratteristiche di scenari in cui risultano presenti molte stimolazioni rotazionali [25] e le meccaniche di shooting, molto diffuse nelle applicazioni VR odierne [60].

4.3 Viking village – Waypoint navigation

4.3.1 Design

Il VE che compone questo terzo scenario consiste in un ampio villaggio in stile vichingo [26] (Fig. 4.6) posto lungo una costa marittima, sul cui sfondo si stagliano alcune montagne che ne segnano il confine e che fungono da barriera visiva [26, 62]. L'utente si muove liberamente all'interno di tale villaggio, senza poter uscire dalle sue mura, transitando nei pressi, o all'interno, di numerose costruzioni dettagliate, quali case, capanni e pontili.

Figura 4.6: visuale dall'alto del villaggio vichingo

Il VE è, pertanto, costituito da ampi spazi esterni (fig. 4.7-a), ricchi di dettagli e ornamenti (si trovano, ad esempio, catasti di legno, barche, spade, scudi e barili), illuminati da una luce più naturale che simula la luce diurna del sole, e da spazi interni o coperti (fig. 4.7-b), colmi di dettagli visibili nelle immediate prossimità dell'utente (fatto dovuto ai passaggi talvolta angusti in cui risulta necessario transitare), in cui la luce risulta essere meno intensa.

(a) (b)

Figura 4.7: visuale dell'utente negli spazi aperti del villaggio (a) e negli spazi interni – al coperto (b)

All'interno del percorso che il partecipante deve compiere con il fine di completare il suo task, sono inoltre presenti alcuni dislivelli e ostacoli, quali assi, scale, ponti, travi di legno da evitare, rocce e passaggi angusti (Fig. 4.8), che l'utente deve superare correndo, saltando (tramite il pulsante associato sui controller) o chinandosi fisicamente (nel mondo reale).

L'utente, come citato sopra, può muoversi liberamente entro i confini del VE; la modalità di movimento scelta consiste nell'utilizzo dei controller per effettuare i movimenti traslazionali (ovvero, movimento da punto A ad un punto B), laddove le rotazioni della visuale corrispondono

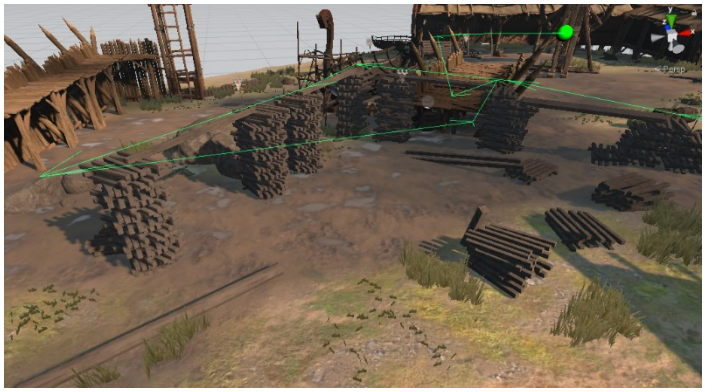


Figura 4.8: esempio di ostacoli (ponti) da superare lungo il percorso (percorso indicato in verde)

ai movimenti rotazionali compiuti dal corpo (o dalla testa) nel mondo reale. In particolare, per muoversi in una direzione arbitraria, il partecipante deve puntare il controller nella direzione desiderata, tenendone premuto il *trackpad* (ad esempio, se l'utente volesse muoversi in avanti, punterà il controller in direzione frontale tenendo premuto il trackpad associato); inoltre, sullo stesso controller, il tasto laterale (*gripper*) e il grilletto (*trigger*) permettono rispettivamente di correre e saltare durante il moto.

Infine, sono presenti feedback sonori relativi al corretto svolgimento dei task, rumori ambientali, un ticchettio che segna lo scorrere del tempo, e alcuni suggerimenti volti ad aiutare l'utente nello svolgimento del suo task (in questo caso, si tratta di una freccia, posta frontalmente alla direzione di vista, che aiuta il partecipante a identificare la corretta direzione in cui muoversi per proseguire nello svolgimento del proprio task).

4.3.2 Task

All'utente immerso in questo terzo scenario viene posto un task di *waypoint navigation* [24]: egli deve, infatti, seguire un percorso predefinito identificato da una sequenza di monete virtuali (Fig. 4.9), di dimensioni non trascurabili, che deve raccogliere interagendovi con il proprio avatar

(a) (b)

Figura 4.9: moneta virtuale che costituisce un waypoint del percorso (a) e tragitto che l'utente deve percorrere all'interno del villaggio vichingo (indicato in giallo) (b)

virtuale; esse compaiono una alla volta e identificano i singoli punti di interesse che il partecipante deve raggiungere durante l'esperienza.

L'esperienza associata allo scenario consiste in un percorso ciclico di dieci giri, composti da 53 monete ciascuno e situate nelle stesse posizioni ad ogni ripetizione, in cui risulta necessario superare ostacoli di natura varia per raggiungere il punto di interesse successivo.

In modo da semplificare la ricerca delle monete, se l'utente non riesce a identificare la posizione della moneta successiva nella sequenza entro un minuto dall'ultima raccolta, di fronte ad egli viene visualizzata una freccia che suggerisce la direzione verso cui muoversi per proseguire nell'esperienza; la freccia è di colore blu e dai toni intensi, in modo da contrastare facilmente con il resto del VE e risultando, perciò, facilmente visibile.

L'obiettivo principale per l'utente risulta, pertanto, quello di completare il percorso raccogliendo tutte le monete; inoltre, egli deve terminare l'esperienza nel minor tempo possibile.

4.3.3 Misura delle prestazioni

Durante l'esperienza, il tempo di completamento t_c del percorso viene registrato, e messo in relazione ad un tempo massimo e ad un tempo minimo prestabiliti, consistenti rispettivamente nel tempo di completamento a velocità minima e massima consentite (T_{max} e T_{min} rispettivamente); il valore restituito, normalizzato nell'intervallo [0,1], viene utilizzato come metrica di Operation Speed, indicando quindi la velocità di completamento dell'esperienza:

$$OS = 1 - \frac{t_c - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Inoltre, la distanza totale percorsa d_t dall'utente all'interno del VE viene memorizzata e messa in rapporto alla distanza minima d_{min} percorribile per completare il tragitto (o, in caso di terminazione anticipata, alla distanza minima percorribile fino alla prossima moneta nel percorso); il valore di tale rapporto fornisce un valore incluso nell'intervallo [0,1] che identifica *l'Accuracy* dell'utente.

$$A = \frac{d_{min}}{d_t}$$

Infine, viene registrato il numero di monete raccolte in modo da identificare la percentuale di completamento dell'esperienza per il singolo utente.

4.3.4 Utilità

Il task di waypoint navigation permette di valutare e identificare le difficolta riscontrate dall'utente durante esperienze di superamento ostacoli e di ricerca di oggetti all'interno del VE, nel quale l'utente si muove liberamente senza ausilio di veicoli o supporti. In particolare, ciò permette di osservare l'intensità dei sintomi dovuta alla contrapposizione tra il movimento traslazionale all'interno del VE (compiuta tramite comandi sui controller) e la posizione stazionaria (eccetto per le rotazioni) mantenuta dall'utente nel mondo reale.

4.4 Track race – Driving uphill/downhill

4.4.1 Design

In questo ultimo scenario, il partecipante si trova all'interno di un circuito automobilistico (Fig. 4.10) composto da curve, salite, discese e ponti [61]; vi sono inoltre cordoli bianchi e rossi, ai lati della pista, i quali, uniti alla linea di partenza, costituiscono dei dossi artificiali avvertibili dall'utente qualora vi passi sopra.

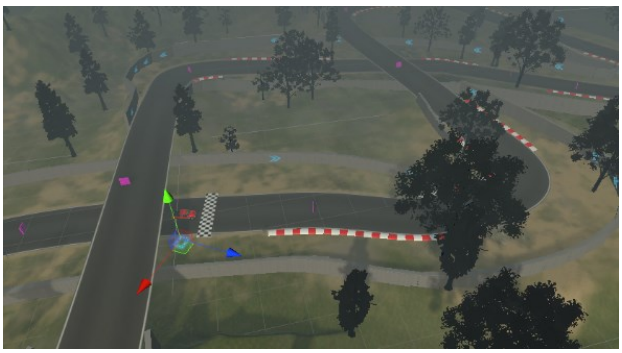


Figura 4.10: visuale dall'alto di un'ampia porzione del circuito

I confini dello spazio percorribile sono identificati da alcune griglie metalliche (Fig. 4.11), sulle quali sono situate indicazioni riguardanti il verso di percorrenza da mantenere all'interno del circuito, consistenti in frecce di colore blu e dalle tonalità intense. Sono inoltre presenti alberi e cartelli stradali posti ai bordi della pista, che costituiscono sia elementi ornamentali, sia ostacoli fisici che possono influire sul movimento del partecipante.

L'automobile all'interno della quale è posto l'utente non è visibile, per non influire sui risultati del test fornendo un rest frame costante per gli occhi dell'utente, ma interagisce comunque con l'ambiente circostante in qualità di corpo rigido con dimensioni predefinite. L'unica indicazione fornita all'utente a riguardo della presenza di questa automobile, consiste in una freccia, posta nella sua direzione frontale, che gli permette di identificare e visualizzare la corretta posizione della parte frontale del veicolo, in modo da non causare confusione nei movimenti.

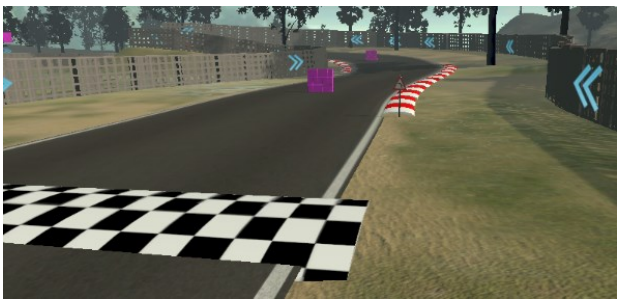


Figura 4.11: visuale all'interno del circuito: griglie metalliche, cordoli, linea di partenza, muri da abbattere (in fucsia) e ostacoli (alberi, cartelli, muri laterali)

All'interno della pista sono posti 15 muri di mattoni di colore fucsia (Fig. 4.11), facilmente identificabili nel VE, ai quali è associata una simulazione fisica che si aziona con l'impatto del veicolo dell'utente (secondo i task che egli deve svolgere durante l'esperienza). Dopo l'impatto,

essi ritornano, dopo un tempo prestabilito, allo stato iniziale in modo da essere interagibili nei giri successivi.

L'utente può muovere liberamente il veicolo in ogni direzione, accelerando, frenando o facendo retromarcia, tramite il trackpad del controller destro, e modificando la direzione di marcia (ruotando il volante) tramite il trackpad di quello sinistro (il movimento dell'automobile è stato realizzato a partire dall'asset "MS Vehicle System" [63], opportunamente modificato per essere compatibile con l'utilizzo in uno scenario VR immersivo).

Sono infine presenti feedback sonori e visivi relativi ad accelerazione e frenata del veicolo e per l'impatto del veicolo con i muri fucsia sopra citati.

4.4.2 Task

L'obiettivo principale dell'utente è quello di percorrere un totale di venti giri all'interno del circuito, completandoli nel minor tempo possibile, e quindi, mantenendo il veicolo per più tempo possibile all'interno della pista (senza uscire quindi dai cordoli). Come anticipato, il circuito si sviluppa su differenti dislivelli e curve: il task principale dello scenario viene, pertanto, definito "driving uphill/downhill", in quanto consiste in un'esperienza di guida in cui l'utente percorre parti del tragitto a differenti livelli di elevazione dal suolo, a causa delle varie salite e discese che contraddistinguono il circuito stesso [26, 32].

Durante la corsa, inoltre, l'utente ha l'ulteriore obiettivo di abbattere e frantumare quanti più muri fucsia possibile, colpendoli direttamente con il proprio veicolo.

Infine, il partecipante deve effettuare i giri stabiliti riducendo al minimo le collisioni con cartelli, alberi e griglie di metallo (i muri fucsia sono esclusi) e il tempo trascorso fuori pista.

4.4.3 Misura delle prestazioni

Il rapporto tra il numero di muri correttamente abbattuti, m_a, e il numero totale di muri presenti nel circuito, m_t, sono tenuti in considerazione e rapportati tra di loro, fornendo una metrica di performance relativa all'Accuracy:

$$A = \frac{m_a}{m_t}$$

Inoltre, la distanza percorsa dall'utente all'interno del circuito e il tempo di completamento sono anch'essi memorizzati; in particolare, il tempo di completamentot_c viene normalizzato tra un tempo minimo T_{min} e un tempo massimo T_{max} di percorrenza, ottenendo un valore incluso nell'intervallo [0,1] identificato come parametro di Operation Speed:

$$OS = 1 - \frac{t_c - T_{min}}{T_{max} - T_{min}}$$

Infine, il rapporto tra il tempo percorso fuori pista o in collisione con gli ostacoli (t_e, tempo in errore), e il tempo totale di completamento dell'esperienza t_c per un dato utente sono

rapportati e il valore così ottenuto viene utilizzato come metrica di Error Proneness per il dato utente (valore incluso sempre nell'intervallo [0,1]), indicando così la percentuale di tempo in cui l'utente ha commesso errori:

$$E = \frac{t_e}{t_c}$$

4.4.4 Utilità

L'utilità di quest'ultimo scenario è da identificare nella possibilità di valutare l'entità dei sintomi e la difficoltà degli utenti VR in un'esperienza di guida ad alta velocità in cui, a differenza di quanto provato nello scenario Rollercoaster, l'utente ha il pieno controllo sul movimento del veicolo su cui è situato [26, 32].

Inoltre, la necessità, per svolgere il task, di abbattere muri fucsia con il veicolo permette di valutare la reazione del partecipante (a livello di sickness percepita) ad impatti e interazioni con elementi virtuali nelle sue immediate vicinanze, in moto con velocità relative elevate.

Infine, la presenza di ostacoli e dossi in grado di modificare la direzione di moto dell'utente permette di valutare la sua reazione a cambiamenti inaspettati nel movimento da egli voluto.

4.5 Procedura

La procedura di test applicata, suddivisa in tre fasi principali, trae la sua origine da quella più ampiamente utilizzata nella letteratura riguardante il problema della cybersickness. Tale procedura, sebbene mostri spesso alcune variazioni di utilizzo, pone le sue fondamenta sulla combinazione di dati soggettivi e oggettivi, estrapolati dai risultati raccolti tramite compilazione, da parte dei singoli soggetti, di alcuni questionari e tramite strumentazione in grado di valutare misure fisiologiche relative alla reazione psicofisica dell'utente nelle singole fasi del test.

Data la varietà nella durata temporale dei quattro scenari di test, che spesso può risultare eccessiva dal punto di vista della resistenza del singolo individuo, ai partecipanti non è richiesto di completare, obbligatoriamente, il singolo test nella sua interezza: essi, infatti, in caso di malessere, possono richiedere di terminare l'esecuzione del test permettendo comunque di ottenere risultati, che, sebbene parziali, sono tuttavia validi e tenuti in considerazione (i risultati ottenuti sono pertanto messi in relazione al tempo di esposizione dell'utente al test nel VE).

La procedura utilizzata in questa sperimentazione risulta composta, come anticipato, da tre fasi essenziali, le quali sono trattate nel dettaglio nei paragrafi successivi.

4.5.1 Pre esperienza

La prima fase della procedura di test consiste in primo luogo nella preparazione dell'ambiente e degli strumenti di test: lo spazio in cui i movimenti dell'utente sono tracciati viene liberato da possibili ostacoli, onde evitare tracciamenti non corretti dei movimenti e collisioni inaspettate con l'ambiente circostante; successivamente, il visore per la VR (HMD) e i controller

sono collegati al computer utilizzato, e viene quindi controllato il loro corretto funzionamento; in seguito, viene inizializzata l'area in cui sono tracciati i movimenti nel VE (laddove non fosse già stata inizializzata in precedenza).

Una volta completata la preparazione della strumentazione di test, l'utente viene posizionato all'interno dell'area designata per la sperimentazione, gli viene associato un numero intero univoco che ne costituisce il codice identificativo e gli vengono posti alcuni questionari a risposta soggettiva. Successivamente, vengono registrati alcuni dati anagrafici essenziali del partecipante, quali nome e cognome, data di nascita e sesso.

All'utente viene, pertanto, posto un breve questionario, definito General Questionnaire, composto da alcune domande relative alla sua esperienza in alcuni ambiti di interesse, alle quali deve fornire una risposta numerica compresa nell'intervallo tra i valori uno (associato alla risposta "per nulla") e cinque (ovvero "molto"). Il valore medio di tali risposte viene quindi calcolato e utilizzato come un indice generico di esperienza del singolo partecipante.

A seguire, all'utente viene sottoposto il questionario MSSQ [42] in versione ridotta [43], con lo scopo di identificare, e predire quanto più possibile, la suscettibilità individuale agli stimoli psicofisici che egli può incontrare durante l'immersione nel VE di test. In particolare, l'MSSQ consiste in un elenco di nove tipologie di movimento differente (tra cui mezzi di trasporto e attrazioni); per ogni tipologia, il partecipante deve rispondere alla domanda "Quanto spesso ti sei sentito male o nauseato?", ripentendo la risposta in primis per quanto riguarda la sua infanzia (<12 anni), e successivamente per gli ultimi 10 anni. Le risposte possono variare da "mai", "raramente", "ogni tanto" o "frequentemente" (alle quali viene associato un valore, in ordine, da 0 a 3), o "mai provato" nel caso l'utente non abbia mai provato tale tipologia di movimento (ad esempio, un utente che non ha mai preso l'aereo risponderà "mai provato" alla domanda). Il completamento di tale questionario fornisce un valore, identificato come MSSQ RawScore, calcolato con la seguente formula [43]:

$$MSSQ\ RawScore = MSA + MSB,$$

dove MSA e MSB sono calcolati come:

$$MSA = \frac{total\ sickness\ score\ as\ child * 9}{(9 - number\ of\ types\ not\ experienced\ as\ a\ child)}$$

$$MSB = \frac{total\ sickness\ score\ as\ an\ adult * 9}{(9 - number\ of\ types\ not\ experienced\ as\ an\ adult)},$$

essendo *total sickness score* il punteggio totale ricavato dalla somma dei valori numerici delle risposte, separatamente per età infantile e adulta, escludendo le risposte della tipologia "mai provato", il cui numero totale costituisce invece il numero di tipologie non sperimentate in età adulta o, rispettivamente, durante l'infanzia (*number of types not experienced as* ...).

Il valore totale così ricavato, ovvero il MSSQ RawScore, è un numero reale incluso nell'intervallo di valori [0,54]; ad un valore prossimo all'estremo destro dell'intervallo, pertanto, risulta associata una maggiore suscettibilità dell'utente a presentare sintomi di cybersickness

durante un'esperienza VR, mentre un risultato che si avvicina all'estremo sinistro ne designa, almeno teoricamente, una maggiore resistenza nell'immersione nel VE.

In vista di un corretto svolgimento della sperimentazione, gli utenti che hanno ottenuto un punteggio MSSQ RawScore >= 27 non vengono tenuti in considerazione, in quanto la loro suscettibilità alla sickness è ritenuta troppo elevata, essendo nella metà dell'intervallo dei valori più prossima al valore massimo.

In seguito al completamento dell'MSSQ, al partecipante viene sottoposto un questionario *SSQ* [44] pre-esperienza, il quale consiste in un elenco di 16 sintomi differenti relativi alla sickness, appartenenti ad almeno una di tre tipologie principali: sintomi di nausea, sintomi oculomotori e sintomi di disorientamento. L'utente deve descrivere l'entità percepita di ogni sintomo nel momento in cui gli viene posto il questionario, fornendo una risposta tra "nessuno", "leggero", "moderato" o "elevato", alle quali viene associato un valore numerico appartenente all'intervallo intero [0,3]. Da tali risposte è possibile ricavare un punteggio relativo all'intensità percepita per singola tipologia di sintomi (nausea, oculomotori e di disorientamento, i cui valori sono indicati, rispettivamente, come "N", "O" e "D"), e un punteggio generico, noto come Total Severity, che identifica, con un valore compreso nell'intervallo reale [0,235], la gravità dei sintomi di cybersickness avvertita dai soggetti. Il calcolo di tali punteggi avviene nel seguente modo [45]:

$$N = [1] * 9.54$$
$$O = [2] * 7.58$$
$$D = [3] * 13.92$$
$$TS = ([1] + [2] + [3]) * 3.74,$$

	Weight		
SSQ Symptom	N	O	D
General discomfort	1	1	
Fatigue		1	
Headache		1	
Eyestrain		1	
Difficulty focusing		1	1
Increased salivation	1		
Sweating	1		
Nausea	1		1
Difficulty concentrating	1	1	
Fullness of head			1
Blurred vision		1	1
Dizzy (eyes open)			1
Dizzy (eyes closed)			1
Vertigo			1
Stomach awareness	1		
Burping	1		
Total	[1]	[2]	[3]

Figura 4.12: i 16 sintomi con le relative tipologie di appartenenza (indicate in tabella dal valore '1' sotto l'identificativo delle classi) [45]

dove [1], [2] e [3] è il valore totale ricavato dalla somma delle risposte per singola tipologia (Fig. 4.12) [45].

In sintesi, sottoporre l'utente il questionario SSQ prima di effettuare il test nel VE permette di identificare e valutare le sue condizioni salutari di partenza, eliminando possibili influenze iniziali considerando la variazione nei valori raccolti poi ad esperienza terminata.

Terminati i questionari, ai partecipanti viene poi esposto il significato del test a loro assegnato e ne vengono specificati nel dettaglio i comandi, necessari al corretto funzionamento dell'esperienza, e gli obiettivi che essi devono svolgere durante il test (ad esempio, raccogliere monete, eliminare nemici etc.).

Viene poi registrato il battito cardiaco dell'utente e, solo in seguito, gli viene chiesto di indossare e regolare, nella maniera a lui più consona, l'HMD utilizzato per i test.

Terminata questa prima fase, il test ha inizio.

4.5.2 Durante l'esperienza

Durante lo svolgimento del test, è necessario limitare per l'utente, quanto più possibile, le distrazioni provenienti dal mondo reale, in modo da non influenzare negativamente i sensi di presenza e immersione che egli prova all'interno del VE di test.

Tuttavia, ad intervalli regolari ai partecipanti viene posta una breve domanda relativa al come essi si sentano (a livello di sintomi percepiti), alla quale viene chiesto di rispondere fornendo un numero intero compreso nell'intervallo tra 1 e 10, estremi inclusi, associando sintomi di entità maggiore ai numeri più alti, seguendo pertanto l'utilizzo della scala di valori nota come Discomfort Scale [25,46] (ad esempio, un utente che non prova alcun fastidio risponderà con 1, laddove un altro, che avverte un malessere non trascurabile, risponderà con un numero più alto nella scala di valori). Nel caso estremo in cui il partecipante fornisce il valore 10 come risposta, associato ad una sensazione di malessere tale da non riuscire più a proseguire nel test, l'esecuzione dell'esperienza viene interrotta [25]; altrimenti, l'esperienza prosegue fino alla terminazione (o, in ogni caso, alla richiesta esplicita, da parte dell'utente, di terminazione anticipata).

4.5.3 Successivamente all'esperienza

Terminata l'esperienza virtuale, l'HMD viene rimosso dalla testa dell'utente e, solo in seguito, viene nuovamente registrato il suo battito cardiaco. Tale valore viene quindi messo in relazione con quello registrato prima del test, fornendo un risultato, identificato come ΔHR (ovvero, la variazione del valore di HR), che visualizza la variazione del battito cardiaco dovuta al test appena eseguito.

All'utente viene nuovamente sottoposto un secondo questionario SSQ (post-esperienza) nelle modalità descritte in precedenza. I valori ricavati da tale questionario sono quindi relazionati a quelli registrati nell'SSQ pre-esperienza, calcolandone la variazione e ottenendo così i valori identificati come ΔN, ΔO, ΔD e la Total Severity finale. Viene, quindi, posta maggiore attenzione a quest'ultimo valore [15]: un risultato di Total Severity minore o uguale a 20 su 235 indica la presenza di sintomi trascurabili e, talvolta, nemmeno percepiti dall'utente; un valore compreso tra 20 e 100 indica invece un malessere/fastidio sicuramente percepito dal soggetto, dovuto alla presenza di alcuni sintomi di intensità medio-alta; infine, un valore superiore a 100 indica sintomi

gravi, in grado di durare diverse ore dopo la terminazione del test, che consentono di identificare la persona come "attivamente ammalata"[44].

Le risposte fornite dagli utenti nell'SSQ sono, inoltre, trasposte e utilizzate in tre sue varianti, i questionari noti come F-SSQ, CSQ e VRSQ, in modo da mettere in luce eventuali caratteristiche non facilmente visualizzabili dai risultati precedenti. Ciò risulta possibile a posteriori, e quindi non sottoponendo tutti i questionari all'utente, in quanto essi basano il calcolo dei loro punteggi su risposte numeriche riguardanti sottoinsiemi dei sintomi appartenenti all'SSQ, variando solamente le modalità in cui i singoli valori vengono calcolati [17].

La prima variante, il cosiddetto F-SSQ, considera i 16 sintomi come appartenenti a due sole categorie, Nausea e Oculomotor [47]; i sintomi sono associati ad una sola categoria, senza sovrapposizioni, secondo quanto riportato nello schema presente in (Fig. 4.13). Per ambo le categorie, il punteggio relativo è calcolato come il valore medio tra i punteggi di tutti i sintomi appartenenti a tale categoria (indice quindi compreso tra 0 e 3), e il Total Score è calcolato come la somma dei risultati di Nausea e Oculomotor (indice pertanto compreso nell'intervallo [0,6]).

La variante CSQ, proposta da Stone III [48], si compone invece di 9 sintomi, catalogati, senza sovrapposizioni, nelle classi di *Dizziness* e *Difficulty in focusing*, alle quali l'autore del questionario suggerisce di riferirsi per valutare, rispettivamente, alti livelli e bassi di cybersickness [17]. I punteggi ottenuti dalle risposte all'SSQ vengono collassati nell'intervallo da 0 a 2: i sintomi "elevati" e "moderati" vengono pertanto amalgamati. Ai singoli sintomi è inoltre associato un peso valutato empiricamente dall'ideatore del questionario, riportati in (Fig. 4.13). Il calcolo dei valori corrispondenti alle due classi del CSQ avviene secondo la seguente formula [17]:

$$[Classe_i] = \sum(ItemScore_{i,j} * itemWeight_{i,j}),$$

essendo *i* l'indice della classe di appartenenza, e *j* l'indice del sintomo. Il questionario non fornisce un *Total Score* come i precedenti: la sua lettura è interamente concentrata nella differenza di valore nelle due classi.

L'ultima variante, nota come VRSQ, si compone di un sottoinsieme di 9 sintomi dell'SSQ, identificati come appartenenti alle due categorie di Oculomotor e Disorientation [49], secondo quanto riportato in (Fig. 4.13), senza sovrapposizioni: un sintomo, pertanto, appartiene al più ad una classe. Il calcolo dei valori risultanti per le classi avviene secondo le seguenti formule [17,49]:

$$Oculomotor = \frac{[H]}{12} * 100$$

$$Disorientation = \frac{[I]}{15} * 100$$

essendo [H] e [I] valori interi positivi corrispondenti alla somma delle intensità dei sintomi (nell'intervallo [0,3]) appartenenti rispettivamente alla classe Oculomotor e Disorientation. Infine, da tali valori può essere facilmente calcolato un Total Score che consente di avere una visuale più generale sull'intensità della sickness provata dall'utente, identificata nell'intervallo dei valori compresi tra 0 e 100. Il calcolo del totale è semplice [17]:

Symptoms in dimensions of simulator sickness and cybersickness scales.

	SSQ			F-SSQ		CSQ		VRSQ	
	Nausea	Oculomotor	Disorientation	Nausea	Oculomotor	Dizziness	Difficulty in focusing	Oculomotor	Disorientation
General discomfort	✓	✓		✓				✓	
Fatigue		✓			✓			✓	
Headache		✓			✓	.50			✓
Eyestrain		✓			✓		.58	✓	
Difficulty focusing		✓	✓		✓		.89	✓	
Increased salivation	✓			✓					
Sweating	✓			✓					
Nausea	✓		✓	✓		.84			
Difficulty concentrating	✓		✓		✓				
Fullness of head			✓		✓		.55		✓
Blurred vision		✓	✓		✓		.81		✓
Dizzy (eyes open)			✓	✓		.89			
Dizzy (eyes closed)			✓	✓		.99			✓
Vertigo			✓	✓		.54			✓
Stomach awareness	✓			✓					
Burping	✓				✓				
	[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	[F]	[G]	[H]	[I]

Figura 4.13: sintomi e classi di appartenenza nei differenti questionari [17]

$$Total = \frac{Oculomotor\ score + Disorientation\ Score}{2}$$

Successivamente, dei risultati relativi alle singole classi di ogni questionario vengono calcolate: media e deviazione standard per visualizzare più facilmente l'andamento dei dati raccolti su utenti multipli; media dei valori normalizzati, in modo tale da ottenere dei valori medi, compresi tra 0 e 1, che siano tra loro confrontabili per identificare la categoria di sintomi in cui si riscontra l'intensità più elevata tra gli utenti di test; numero intero di sintomi incrementati per classe per i singoli utenti (solamente nel caso dell'SSQ), con il fine di visualizzare, globalmente, la classe che ha presentato il maggior numero di incrementi nell'intensità dei sintomi che la compongono.

Infine, le variazioni di intensità dei singoli sintomi sono registrate per tutti gli utenti che hanno effettuato lo stesso test. Ciò consente di ottenere due classifiche dei singoli sintomi: la prima permette di visualizzare i sintomi in ordine di incremento medio dell'intensità; la seconda consente di identificare quali sintomi si sono presentanti più frequentemente durante le esecuzioni di uno stesso test su più utenti.

4.5.4 Partecipanti

I test, in tutto 68 uniformemente distribuiti sui quattro scenari che compongono lo strumento, sono stati effettuati da utenti con caratteristiche anagrafiche differenti: essi sono stati selezionati in base a differenze individuali in età, sesso ed esperienza media negli ambiti di interesse per la sperimentazione.

4.5.5 Apparati e materiali

Una smartband Xiaomi Mi Band 4 è stata utilizzata per monitorare e registrare i valori del battito cardiaco degli utenti prima e dopo l'esperienza virtuale.

L'HMD utilizzato per eseguire e valutare il corretto funzionamento di questo strumento di testbed consiste nel visore Samsung Galaxy Odyssey VR, il quale, sebbene ideato per la realtà mista di Windows (WMR, *Windows Mixed Reality*), è stato utilizzato con la realtà mista di SteamVR, tramite il software *Windows Mixed Reality for SteamVR*. Il testbed è stato infatti realizzato, tramite Unity, per SteamVR, in modo da poter essere compatibile con un maggior numero di HMD presenti sul mercato.

Infine, il computer su cui è stata effettuata l'esecuzione dello strumento software è un Acer Nitro 5 AN515, con processore AMD Ryzen 9 5900HX, scheda video VR-Ready NVIDIA GeForce RTX 3080 e RAM da 32 GB, che ha permesso di eseguire con fluidità ottimale tutti i test.

5.Risultati e discussione

5.1 Partecipanti

Come anticipato, per valutare l'efficacia dello strumento realizzato in questa tesi, si è realizzato un numero totale di 68 test, distribuiti uniformemente tra i 4 scenari che lo compongono, ottenendo così 17 test per scenario.

Gli utenti sottoposti ai test sono stati selezionati in base a differenze individuali in età, sesso ed esperienza media negli ambiti di interesse per la sperimentazione; tra i volontari, il 63.41% era di sesso maschile e il restante 36.59% di sesso femminile. L'età media tra gli utenti è risultata pari a 29.10 anni (SD = 10.21) e con punteggio di esperienza media pari a 2.83 (nell'intervallo [1,5]; SD = 0.73).

Inoltre, tutti gli utenti selezionati per i test presentano un MSSQ RawScore < 27.00. Ciò consente di identificarli come utenti con una bassa suscettibilità alla sickness: il valore dell'MSSQ RawScore appartiene infatti all'intervallo reale [0,54], dove al valore minimo è associata una suscettibilità ipoteticamente nulla e, rispettivamente, al massimo risulta accoppiata una suscettibilità dell'utente elevata; la suddivisione binaria di tale intervallo permette pertanto di identificare i soggetti di test con un punteggio RawScore < 27 come quelli in grado di sopportare meglio esposizioni prolungate al VE e, conseguentemente, coloro che presentano un punteggio di RawScore >=27 come altamente suscettibili alla VR.

Infine, il valore medio dell'MSSQ RawScore per tutti i partecipanti è pari a 7.61 (intervallo [0,54], SD = 6.28): ciò indica, pertanto, una suscettibilità alla sickness in media molto bassa tra tutti i partecipanti.

5.2 Rollercoaster – Uncontrolled follow path

5.2.1 Composizione partecipanti

In questo primo scenario, sono stati effettuati 17 test su 11 partecipanti di sesso maschile e 6 di sesso femminile, con età media complessiva pari a 33.82 anni (SD = 13.79), punteggio di esperienza media pari a 2.78 (SD = 0.75) e MSSQ RawScore medio pari a 7.05 (SD = 5.36).

5.2.2 SSQ

I valori raccolti dalle risposte ai questionari SSQ posti agli utenti sono stati suddivisi nelle tre categorie di sintomi di Nausea, Oculomotor e Disorientation, indicati rispettivamente da ΔN,

ΔO e ΔD, dai quali viene calcolato il valore della Total Severity per il singolo utente. Viene quindi calcolato il valore medio di ogni punteggio per ottenere una visione più generale per lo scenario. Alla categoria di Nausea corrisponde un valore medio pari a MD = 86.98 nell'intervallo [0,200] (SD = 37.15); ad Oculomotor corrisponde un valore medio di MD = 50.83 nell'intervallo [0,159] (SD = 32.13); alla classe Disorientation, invece, corrisponde un punteggio medio di MD = 90.56 (intervallo [0,292], SD = 58.12); infine, alla Total Severity è associato un valor medio di MD = 83.82 nell'intervallo [0,235] (SD = 40.77).

Per ottenere una maggiore facilità di confronto tra le categorie, è inoltre calcolato il valor medio dei punteggi delle singole classi normalizzate nell'intervallo di appartenenza. Si ottengono così i seguenti valori: valor medio normalizzato di Nausea pari a $MD_{norm} = 0.43$, di Oculomotor pari a $MD_{norm} = 0.32$ e Disorientation pari a $MD_{norm} = 0.31$. Alla Total Severity è invece associato un valore medio normalizzato $MD_{norm} = 0.36$.

5.2.3 VRSQ

Le risposte al questionario precedente consentono di calcolare, in questo sua variante, i punteggi relativi a due classi, Oculomotor e Disorientation, e il VRSQ Total Score, tutti calcolati nell'intervallo [0,100]. I risultati sono i seguenti:

- Oculomotor: MD = 37.25, SD = 23.42
- Disorientation: MD = 24.71, SD = 19.24
- VRSQ-TS: MD = 30.98, SD = 19.84

5.2.4 F-SSQ

Dall'SSQ si ricavano inoltre i punteggi relativi alle classi di Nausea (intervallo [0,3]), Oculomotor (intervallo [0,3]) e il punteggio totale (intervallo [0,6]) di questa ulteriore variante del questionario. Otteniamo, in particolare, i seguenti valori:

- Nausea: MD = 1.34, SD = 0.50
- Oculomotor: MD = 1.01, SD = 0.58
- FSSQ-TS: MD = 2.35, SD = 0.93

È risultato inoltre necessario normalizzare tali valori per renderli confrontabili. Si ottengono così i seguenti risultati:

- Nausea: $MD_{norm} = 0.45$
- Oculomotor: $MD_{norm} = 0.34$
- FSSQ-TS: $MD_{norm} = 0.39$

5.2.5 CSQ

Si ottengono infine, a partire dai dati utilizzati per i due questionari precedenti, i punteggi relativi alle classi di Dizziness (intervallo [0,7.52]) e Difficulty in focusing (intervallo [0,5.66]) di quest'ultima variante dell'SSQ. In particolare, si ottengono i valori non normalizzati di:

- Dizziness: MD = 3.29, SD = 1.55

- Difficulty in focusing: MD = 1.87, SD = 2.03

I quali, normalizzati, corrispondono ai seguenti punteggi:

- Dizziness: $MD_{norm} = 0.44$
- Difficulty in focusing: $MD_{norm} = 0.33$

5.2.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione

Una prima classificazione dei singoli sintomi registrati dagli utenti in questo scenario avviene secondo la frequenza in cui il singolo sintomo ha registrato un incremento di intensità durante i test. Per ogni utente, dall'SSQ è possibile infatti estrarre l'incremento relativo di ognuno dei 16 sintomi che compongono il questionario; per valutare la frequenza con cui si sono presentato i singoli sintomi, per ognuno di essi si effettua il conteggio degli incrementi con intensità non nulla. La massima frequenza corrisponde pertanto ad un incremento registrato in tutti i 17 test.

Come si può evincere da (Fig. 5.1), la frequenza (*f*) maggiore è stata registrata nei sintomi di Malessere/Fastidio generale ($f = 16/17$), Nausea ($f = 15/17$), Sudorazione ($f = 13/17$) e Difficoltà nel concentrarsi ($f = 13/17$).

5.2.7 Classifica sintomi per intensità media

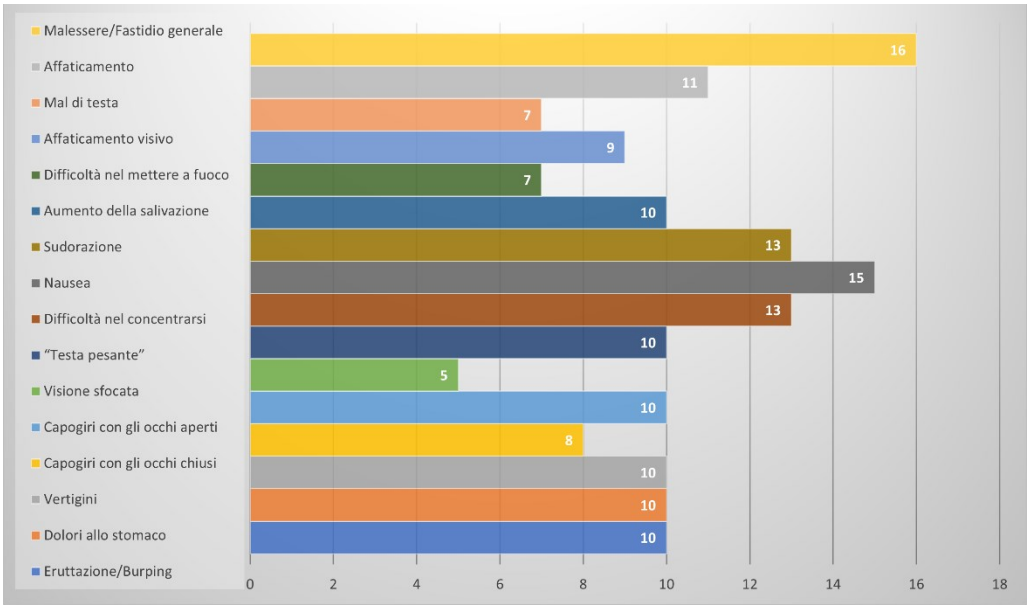


Figura 5.1: sintomi per frequenza nello scenario Rollercoaster

Dai valori ottenuti dalle risposte degli utenti al questionario SSQ è possibile, inoltre, classificare i sintomi in ordine di incremento medio dell'intensità tra tutti i test effettuati. Per il singolo utente, un sintomo può infatti incrementare la sua intensità di un valore incluso nell'intervallo [0,3], estremi inclusi.

Calcolando la media di questi valori trasversalmente su tutti gli utenti che hanno effettuato il test su questo scenario, si può quindi facilmente visualizzare e identificare una seconda classificazione dei sintomi, che, per l'appunto, tiene conto dell'intensità media registrata durante tutti i test**.** Come visualizzato in (Fig. 5.2), i sintomi prevalenti in entità *(i)* registrata sono

in ordine Malessere/Fastidio generale (i = 1.82), Nausea (i = 1.71), Sudorazione (i = 1.59) e Difficoltà nel concentrarsi (i = 1.35).

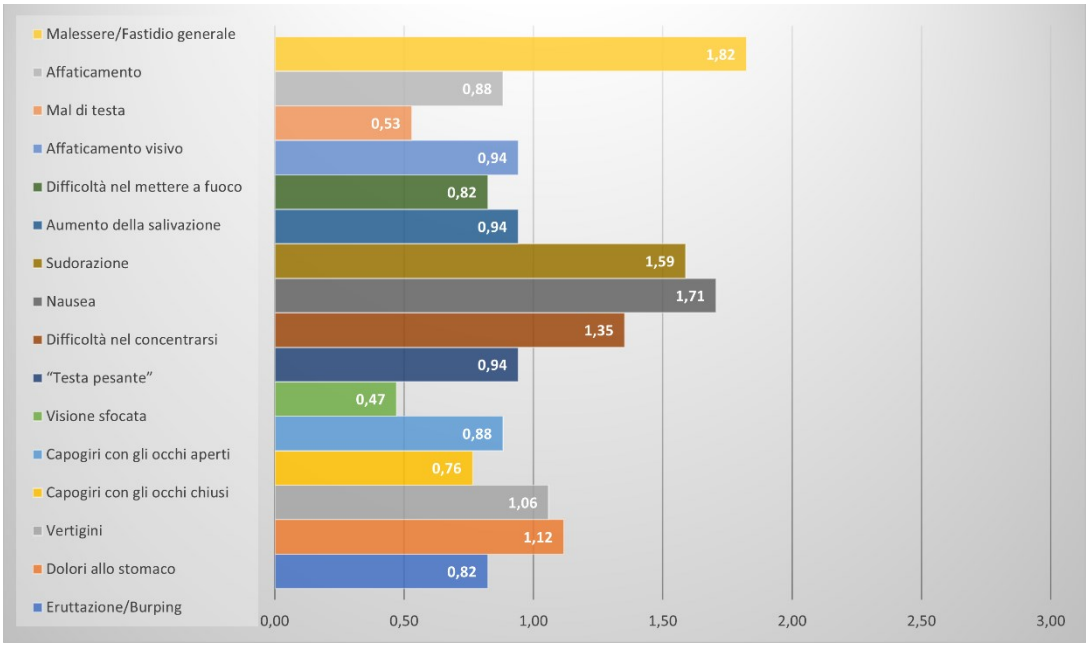


Figura 5.2: intensità media dei sintomi registrata nello scenario Rollercoaster

5.2.8 Misure oggettive

Per ogni test sono state estratte e calcolate due principali misure oggettive: il tempo di completamento, che indica per quanto tempo il singolo utente sia stato esposto al VE prima di interrompere o completare l'esecuzione del test, e la variazione del battito cardiaco (ΔHR, pre- e post-test). Dai valori ottenuti per ogni test, quindi, è stato possibile il calcolo l'andamento medio e la deviazione standard di ambo le misure oggettive a partire da tutti i 17 test. Per questo primo scenario, in particolare, si è registrato un tempo di completamento medio pari a MD = 8 minuti e 21 secondi, con una deviazione standard pari a 3 minuti e 46 secondi (SD = 226.26 secondi), e un ΔHR medio pari a MD = 0.53 (SD = 13.21).

Infine, i test realizzati sono stati suddivisi tra test terminati prematuramente e test portati al completamento. Ciò ha permesso di calcolare, in questo scenario, una percentuale di interruzioni anticipate pari al 66.67%.

5.2.9 Prestazioni

Alla terminazione del singolo test, l'applicazione fornisce un report (un file .csv) in cui sono riportate prestazioni misurate per l'utente corrispondente.

Le misure registrate in questo scenario sono in particolare Operation Speed, Accuracy, la velocità media mantenuta dall'utente durante il test e il numero di giri del circuito da egli completati. Come per le altre tipologie di misure, anche da ognuna di esse è stato possibile estrarre e calcolare un andamento medio, e una deviazione standard, mantenuti durante i 17 test associati. Sono così stati calcolati i seguenti risultati: Operation Speed con MD = 0.76 (SD = 0.17, intervallo [0,1]), Accuracy con MD = 0.76 (SD = 0.14, intervallo [0,1]), velocità mantenuta

dall'utente con MD = 19.61 (SD = 7.48) e numero di giri completati con valor medio MD = 4.59 (SD = 2.68) su un totale di 8 giri.

5.2.10 Correlazioni

Dai dati precedenti, è stato inoltre possibile identificare correlazioni (calcolate con il metodo di Pearson) tra l'andamento dei risultati registrati. Ciò ha permesso, in questo scenario, di identificare:

- una correlazione negativa significativa tra l'esperienza pregressa degli utenti e la Total Severity registrata dall'SSQ ($r = –0.36$)
- una correlazione positiva tra età del partecipante e punteggio della categoria di Nausea ottenuto dall'SSQ ($r = 0.53$)
- una correlazione negativa tra metrica di accuratezza e Total Severity ($r = –0.53$)
- una correlazione negativa significativa tra tempo di completamento al VE e Total Severity ($r = –0.59$).

5.2.11 Discussione dei risultati dello scenario

A partire da tutti i dati ottenuti dalle singole misure oggettive, soggettive e di prestazioni, possiamo trarre alcune interessanti conclusioni.

In primo luogo, dai valori medi normalizzati calcolati a partire dall'SSQ è possibile facilmente indicare come i sintomi appartenenti alla categoria di Nausea siano quelli maggiormente influenzati da questo scenario, seguiti da Oculomotor e Disorientation a parimerito.

In secondo luogo, è possibile osservare come, nonostante un tempo di completamento medio alquanto breve, l'intensità media dei singoli sintomi e i punteggi delle categorie dell'SSQ risultino elevati, ottenendo, ad esempio, un punteggio di 83.83 su un totale di 235 per la Total Severity, ricordando che, come riportato dall'autore del questionario, ai sintomi fastidiosi e non trascurabili corrisponde un punteggio nell'intervallo [20,100].

Un indice simile di intensità dei sintomi generati è fornito dai questionari che costituiscono le varianti all'SSQ: dal Total Score, normalizzato, del VRSQ (TS = 0.31) e dell'F-SSQ (TS = 0.34), è possibile infatti osservare un punteggio di intensità totale coerente con quanto riportato dall'SSQ (Total Severity = 0.36, anch'esso normalizzato per facilitare il confronto). Inoltre, osservando i risultati calcolati nel questionario CSQ, la maggiore intensità di sintomi di Dizziness rispetto a quelli della categoria Difficulty on focusing consente di specificare ulteriormente, secondo la lettura suggerita dal suo autore, come l'intensità della sickness generata sia di entità elevata e non trascurabile.

Infine, a partire dai dati anagrafici, oggettivi e dalle metriche di performance, uniti alle correlazioni indicate, è possibile osservare, come si ipotizzava, che ad un indice di esperienza pregressa maggiore è generalmente associata una minore sensazione di sickness. Secondariamente, la forte correlazione tra età e sintomi di nausea percepiti permette di osservare

che gli utenti di età più avanzata sono risultati più proni a subire tale categoria di sintomi in intensità maggiore.

La forte correlazione negativa tra la metrica di Accuracy e Total Severity può essere invece interpretata identificando una minore accuratezza nello svolgimento del task come conseguenza del presentarsi di sintomi elevati durante il test.

Infine, l'elevata correlazione negativa tra tempo di completamento e Total Severity permette di visualizzare come, generalmente, un utente che sta provando una sensazione di sickness elevata spesso preferisca terminare anticipatamente l'esperienza virtuale piuttosto che proseguire e portarla eventualmente a terminazione.

5.3 Tower defense – Shooter

5.3.1 Composizione partecipanti

In questo secondo scenario, sono stati effettuati 17 test su 10 partecipanti di sesso maschile e 7 di sesso femminile, con età media complessiva pari a 29.59 anni (SD = 12.14), punteggio di esperienza media pari a 2.80 (SD = 0.74) e MSSQ RawScore medio pari a 7.09 (SD = 6.83).

5.3.2 SSQ

Dai valori raccolti dalle risposte ai questionari SSQ, suddivisi nelle tre categorie di sintomi di Nausea, Oculomotor e Disorientation, e dal valore delle Total Severity dei singoli utenti viene quindi calcolato, come specificato in precedenza, il valore medio di ogni punteggio per ottenere una visione più generale per lo scenario. Alla categoria di Nausea corrisponde un valore medio pari a MD = 35.91 nell'intervallo [0,200] (SD = 24.16); ad Oculomotor corrisponde un valore medio di MD = 29.43 nell'intervallo [0,159] (SD = 19.26); alla classe Disorientation, infine, corrisponde un punteggio medio di MD = 47.49 (intervallo [0,292], SD = 30.96); infine, alla Total Severity è associato un valor medio di MD = 41.36 nell'intervallo [0,235] (SD = 20.66).

Per ottenere una maggiore facilità di confronto tra le categorie, è inoltre calcolato il valor medio dei punteggi delle singole classi normalizzate nell'intervallo di appartenenza. Si ottengono così i seguenti valori: valor medio normalizzato di Nausea pari a $MD_{norm} = 0.18$, di Oculomotor pari a $MD_{norm} = 0.19$ e Disorientation pari a $MD_{norm} = 0.16$. Alla Total Severity è invece associato un valore medio $MD_{norm} = 0.18$.

5.3.3 VRSQ

Dalle risposte al questionario precedente sono stati calcolati i punteggi relativi a due classi, Oculomotor e Disorientation, e il VRSQ Total Score, tutti appartenenti all'intervallo [0,100]. I risultati sono i seguenti:

- Oculomotor: MD = 22.55, SD = 15.59
- Disorientation: MD = 11.77, SD = 10.85

- VRSQ-TS: MD = 17.16, SD = 11.44

5.3.4 F-SSQ

Dall'SSQ si ricavano inoltre i punteggi relativi alle classi di Nausea (intervallo [0,3]), Oculomotor (intervallo [0,3]) e il punteggio totale (intervallo [0,6]) di questa ulteriore variante del questionario. Si ottengono, in particolare, i seguenti valori:

- Nausea: MD = 0.61, SD = 0.36
- Oculomotor: MD = 0.59, SD = 0.37
- FSSQ-TS: MD = 1.20, SD = 0.64

È risultato inoltre necessario normalizzare tali valori per renderli confrontabili. Si ottengono così i seguenti risultati:

- Nausea: $MD_{norm} = 0.20$
- Oculomotor: $MD_{norm} = 0.20$
- FSSQ-TS: $MD_{norm} = 0.20$

5.3.5 CSQ

Si ottengono inoltre, a partire dai dati raccolti nell'SSQ, i punteggi relativi alle classi di Dizziness (intervallo [0,7.52]) e Difficulty in focusing (intervallo [0,5.66]) di quest'ultima variante del questionario. In particolare, si ottengono i valori non normalizzati di:

- Dizziness: MD = 1.68, SD = 1.16
- Difficulty in focusing: MD = 1.66, SD = 1.63

I quali, normalizzati, corrispondono ai seguenti punteggi:

- Dizziness: $MD_{norm} = 0.22$
- Difficulty in focusing: $MD_{norm} = 0.29$

5.3.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione

Una prima classificazione dei singoli sintomi registrati dagli utenti in questo scenario avviene secondo la frequenza in cui il singolo sintomo ha registrato un incremento di intensità durante i test. Per ogni utente, dall'SSQ è possibile infatti estrarre l'incremento relativo di ognuno dei 16 sintomi che compongono il questionario; per valutare la frequenza con cui si sono presentato i singoli sintomi, per ognuno di essi si effettua il conteggio degli incrementi con intensità non nulla. La massima frequenza corrisponde pertanto ad un incremento registrato in tutti i 17 test.

Come si può evincere da (Fig. 5.3), la frequenza maggiore è stata registrata nei sintomi di Affaticamento visivo (f = 11/17), Sudorazione (f = 10/17), Malessere/Fastidio generale (f = 9/17) e Nausea (f = 9/17).

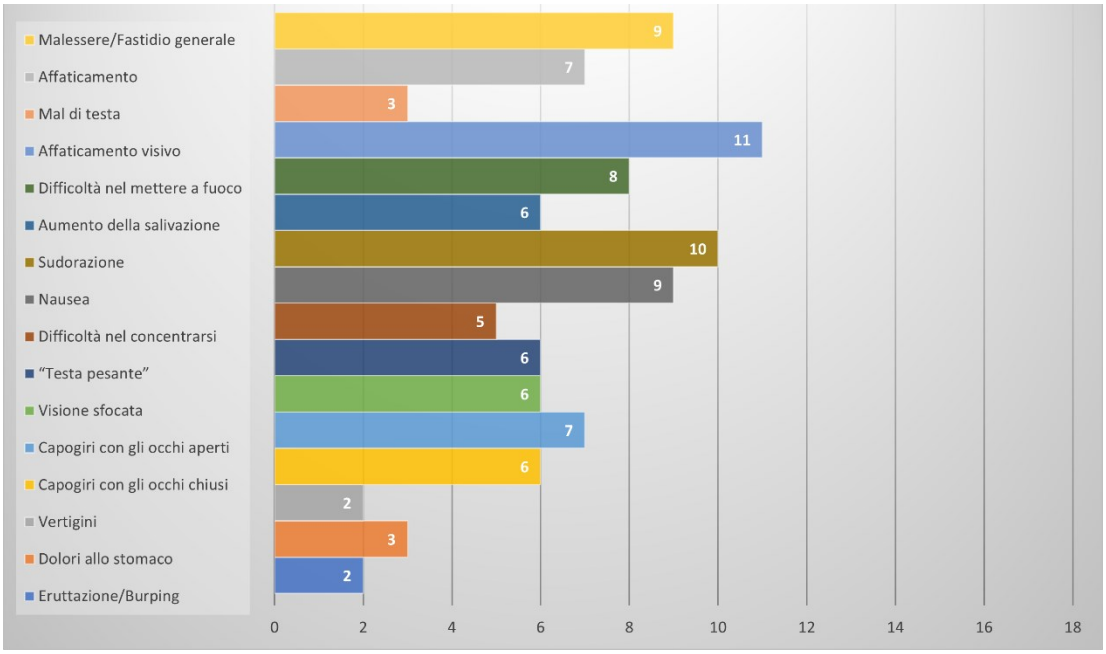


Figura 5.3: sintomi in ordine di frequenza nello scenario Tower defense

5.3.7 Classifica sintomi per intensità media

Dai valori ottenuti dalle risposte degli utenti al questionario SSQ è possibile, inoltre, classificare i sintomi in ordine di incremento medio dell'intensità tra tutti i test effettuati. Per il singolo utente, un sintomo può infatti incrementare la sua intensità di un valore incluso nell'intervallo [0,3], estremi inclusi.

Calcolando la media di questi valori trasversalmente su tutti gli utenti che hanno effettuato il test su questo scenario, si può quindi facilmente visualizzare e identificare una seconda classificazione dei sintomi, che, per l'appunto, tiene conto dell'intensità media registrata durante i test.

Come visualizzato in (Fig. 5.4), i sintomi prevalenti in entità registrata sono in ordine Sudorazione (i = 1.06), Affaticamento visivo (i = 0.82), Malessere/Fastidio generale (i = 0.76) e Nausea (i = 0.71).

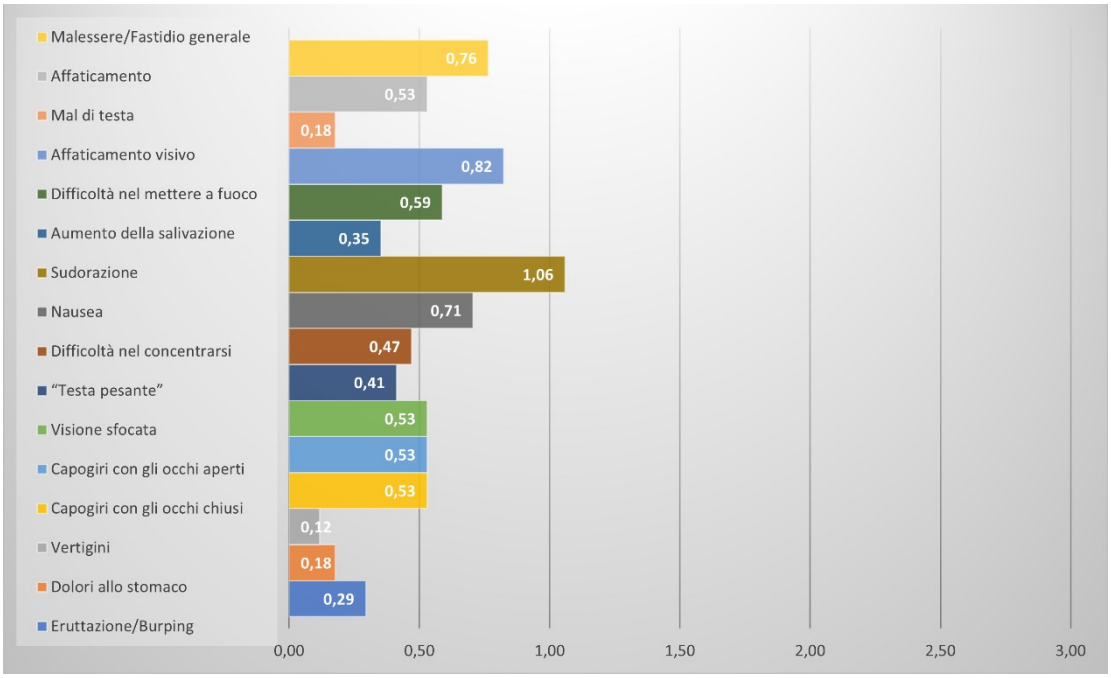


Figura 5.4: incremento medio dell'intensità dei sintomi nello scenario Tower defense

5.3.8 Misure oggettive

Per ogni test sono state estratte e calcolate due principali misure oggettive: il tempo totale di esposizione al VE, e la variazione del battito cardiaco (ΔHR, pre- e post-test). Dai valori ottenuti per ogni test, quindi, è stato possibile il calcolo l'andamento medio e la deviazione standard di ambo le misure oggettive a partire da tutti i 17 test. Per questo scenario, in particolare, si è registrato un tempo di completamento medio pari a MD = 10 minuti e 5 secondi, con una deviazione standard pari a 1 minuto e 36 secondi (SD = 96,61 secondi), e un ΔHR medio pari a MD = 2.00 (SD = 10.91).

Infine, i test realizzati sono stati suddivisi tra test terminati prematuramente e test portati al completamento. Ciò ha permesso di calcolare, in questo scenario, una percentuale di interruzioni anticipate pari al 11.11%.

5.3.9 Prestazioni

Alla terminazione del singolo test, l'applicazione fornisce un report (un file .csv) in cui sono riportate le misure di performance registrate per l'utente corrispondente.

Le misure registrate in questo scenario sono in particolare le metriche di errore e accuratezza. Come per le altre tipologie di misure, anche da ognuna di esse è stato possibile estrarre e calcolare un andamento medio, e una deviazione standard, mantenuti durante i 17 test associati. Sono così stati calcolati i seguenti risultati: Error proneness con MD = 0.44 (SD = 0.13, intervallo [0,1]), Accuracy con MD = 0.39 (SD = 0.14, intervallo [0,1]).

5.3.10 Correlazioni

Dai dati precedenti, non è stato possibile identificare correlazioni significative. Sono tuttavia presenti lievi correlazioni tra:

- MSSQ e Total Severity per il singolo utente ($r = –0.22$)
- età del partecipante e punteggio della categoria di Oculomotor ottenuto dall'SSQ ($r = –0.17$)
- tempo di completamento al VE e Total Severity ($r = 0.30$).

5.3.11 Discussione dei risultati dello scenario

A partire da tutti i dati ottenuti dalle singole misure oggettive, soggettive e di performance, possiamo trarre alcune interessanti conclusioni.

In primo luogo, dai valori medi normalizzati calcolati a partire dall'SSQ è possibile facilmente indicare come i sintomi appartenenti alla categoria di Oculomotor siano quelli maggiormente influenzati da questo scenario, seguiti da Nausea e Disorientation.

In secondo luogo, è possibile osservare come, nonostante un tempo di completamento medio alquanto breve e pressoché identico per tutti i partecipanti, l'intensità media dei singoli sintomi e i punteggi delle categorie dell'SSQ risultino non trascurabili, ma tuttavia non elevati come nello scenario precedente, ottenendo, ad esempio, un punteggio di 41.36 su un totale di 235 per la Total Severity

Un indice simile di intensità dei sintomi generati è fornito dai questionari che costituiscono le varianti all'SSQ: dal Total Score, normalizzato, del VRSQ (TS = 0.17) e dell'F-SSQ (TS = 0.17), è possibile infatti osservare un punteggio di intensità totale coerente con quanto riportato dall'SSQ (Total Severity = 0.18, anch'esso normalizzato per facilitare il confronto). Inoltre, osservando i risultati calcolati nel questionario CSQ, la maggiore intensità di sintomi di Difficulty on focusing rispetto a quelli appartenenti alla categoria di Dizziness consente di specificare ulteriormente, secondo la lettura suggerita dal suo autore, come l'intensità della sickness generata sia di entità lieve, rimanendo tuttavia non trascurabile.

Infine, a partire dai dati anagrafici, oggettivi e dalle metriche di performance, uniti alle correlazioni indicate, è possibile osservare come vi sia una lieve correlazione negativa tra i sintomi oculomotori e l'età del partecipante, la quale può indicare una minore intensità di tali sintomi sugli utenti di età più avanzata. Differentemente dalle ipotesi di partenza, invece, è stata trovata una correlazione negativa non trascurabile tra i valori dell'MSSQ e la Total Severity degli utenti: ciò significa che nei test effettuati, gli utenti che hanno dichiarato una maggiore suscettibilità alla sickness hanno, invece, subito un'intensità dei sintomi generalmente più contenuta rispetto agli altri utenti. Infine, dalla correlazione positiva tra tempo di completamento e Total Severity, sebbene elevata, non si possono tuttavia trarre osservazioni significative, in quanto lo scenario presenta un tempo di completamento predefinito (pari a 10 minuti e 40 secondi) e soltanto 2 partecipanti su 17 hanno terminato l'esecuzione in anticipo e quindi con tempi differenti.

5.4 Viking village – Waypoint navigation

5.4.1 Composizione partecipanti

In questo scenario, sono stati effettuati 17 test su 11 partecipanti di sesso maschile e 6 di sesso femminile, con età media complessiva pari a 29.59 anni (SD = 12.17), punteggio di esperienza media pari a 2.81 (SD = 0.82) e MSSQ RawScore medio pari a 7.88 (SD = 6.05).

5.4.2 SSQ

I valori raccolti dalle risposte ai questionari SSQ posti agli utenti hanno permesso di calcolare il valore medio dei punteggi delle singole categorie di sintomi e della Total Severity, consentendo di ottenere una visione più generale per lo scenario. Alla categoria di Nausea corrisponde un valore medio pari a MD = 67.90 nell'intervallo [0,200] (SD = 25.95); ad Oculomotor corrisponde un valore medio di MD = 31.21 nell'intervallo [0,159] (SD = 27.62); alla classe Disorientation, infine, corrisponde un punteggio medio di MD = 49.95 (intervallo [0,292], SD = 32.75); infine, alla Total Severity è associato un valor medio di MD = 55.44 nell'intervallo [0,235] (SD = 28.11).
Per ottenere una maggiore facilità di confronto tra le categorie, è inoltre calcolato il valor medio dei punteggi delle singole classi normalizzate nell'intervallo di appartenenza. Si ottengono così i seguenti valori: valor medio normalizzato di Nausea pari a $MD_{norm} = 0.34$, di Oculomotor pari a $MD_{norm} = 0.20$ e Disorientation pari a $MD_{norm} = 0.17$. Alla Total Severity è invece associato un valor medio normalizzato pari a $MD_{norm} = 0.24$.

5.4.3 VRSQ

Le risposte al questionario precedente consentono di calcolare, in questo secondo questionario, i punteggi relativi a due classi, Oculomotor e Disorientation, e il VRSQ Total Score, tutti calcolati nell'intervallo [0,100]. I risultati sono i seguenti:

- Oculomotor: MD = 26.47, SD = 21.43
- Disorientation: MD = 12.16, SD = 12.57
- VRSQ-TS: MD = 19.31, SD = 15.60

5.4.4 F-SSQ

Dall'SSQ si ricavano inoltre i punteggi relativi alle classi di Nausea (intervallo [0,3]), Oculomotor (intervallo [0,3]) e il punteggio totale (intervallo [0,6]) di questa ulteriore variante del questionario. Si ottengono, in particolare, i seguenti valori:

- Nausea: MD = 0.96, SD = 0.37
- Oculomotor: MD = 0.69, SD = 0.43
- FSSQ-TS: MD = 1.64, SD = 0.70

È risultato inoltre necessario normalizzare tali valori per renderli confrontabili. Si ottengono così i seguenti risultati:

- Nausea: $MD_{norm} = 0.32$
- Oculomotor: $MD_{norm} = 0.23$
- FSSQ-TS: $MD_{norm} = 0.27$

5.4.5 CSQ

Si ottengono inoltre, a partire dai dati raccolti nell'SSQ, i punteggi relativi alle classi di Dizziness (intervallo [0,7.52]) e Difficulty in focusing (intervallo [0,5.66]) di quest'ultima variante del questionario. In particolare, si ottengono i valori non normalizzati di:

- Dizziness: MD = 2.19, SD = 1.52
- Difficulty in focusing: MD = 0.85, SD = 1.20

I quali, normalizzati, corrispondono ai seguenti punteggi:

- Dizziness: $MD_{norm} = 0.29$
- Difficulty in focusing: $MD_{norm} = 0.15$

5.4.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione

Come specificato in precedenza, una prima classificazione dei singoli sintomi registrati dagli utenti in questo scenario avviene esaminando la frequenza in cui il singolo sintomo ha registrato un incremento positivo di intensità durante i test.

Come si può evincere da (Fig. 5.5), la frequenza maggiore è stata registrata nei sintomi di Malessere/Fastidio generale (f = 16/17), Nausea (f = 14/17), Sudorazione (f = 13/17) e Affaticamento (f = 8/17).

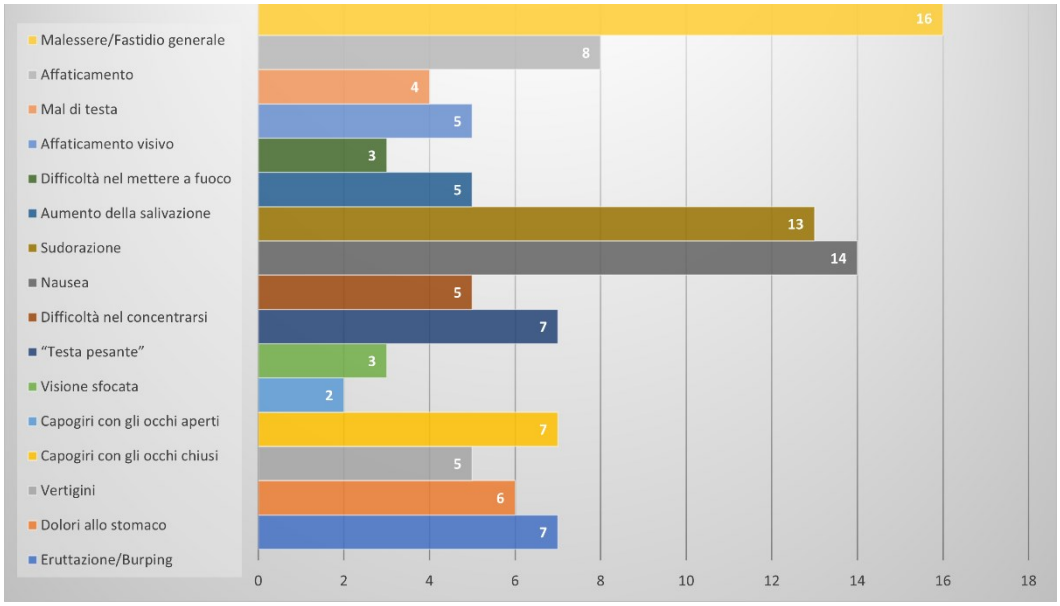


Figura 5.5: frequenza di apparizione dei sintomi nello scenario Viking village

5.4.7 Classifica sintomi per intensità media

Dai valori ottenuti dalle risposte degli utenti al questionario SSQ è possibile, inoltre, classificare i sintomi in ordine di incremento medio dell'intensità tra tutti i test effettuati. Tale valore corrisponde ad un numero reale compreso nell'intervallo [0,3].

Calcolando la media di questi valori trasversalmente su tutti gli utenti che hanno effettuato il test su questo scenario, si può quindi facilmente visualizzare e identificare una seconda classificazione dei sintomi, che, per l'appunto, tiene conto dell'intensità media registrata durante i test**.** Come visualizzato in (Fig. 5.6), i sintomi prevalenti in entità registrata sono in ordine Malessere/Fastidio generale (i = 1.65) a parimerito con Sudorazione (i = 1.65), seguiti da Nausea (i = 1.59) e Affaticamento (i = 0.71).

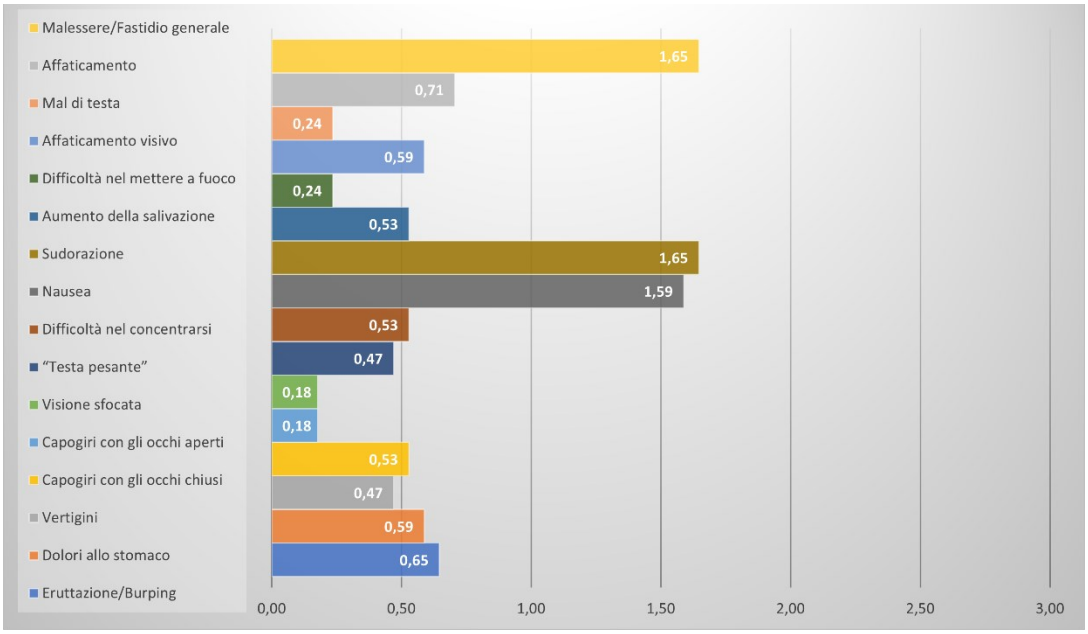


Figura 5.6: intensità media dei sintomi registrata nello scenario Viking village

5.4.8 Misure oggettive

Per ogni test sono state estratte e calcolate due principali misure oggettive: il tempo di completamento, ovvero il tempo totale in cui il partecipante è stato esposto all'applicazione VR, e la variazione del battito cardiaco (ΔHR, pre- e post- test). Dai valori ottenuti per ogni test, quindi, è stato possibile il calcolo l'andamento medio e la deviazione standard di ambo le misure oggettive a partire da tutti i 17 test. Per questo terzo scenario, in particolare, si è registrato un tempo di completamento medio pari a MD = 18 minuti e 37 secondi, con una deviazione standard pari a 13 minuti e 17 secondi (SD = 797.67 secondi), e un ΔHR medio pari a MD = 1.53 (SD = 13.04).

Infine, i test realizzati sono stati suddivisi tra test terminati prematuramente e test portati al completamento. Ciò ha permesso di calcolare, in questo scenario, una percentuale di interruzioni anticipate pari al 83.33%.

5.4.9 Prestazioni

Alla terminazione del singolo test, l'applicazione fornisce un report (un file .csv) in cui sono riportate le misure di performance registrate per l'utente corrispondente.

Le misure registrate in questo scenario sono in particolare Operation Speed, Accuracy, la distanza percorsa dall'utente durante il test e il numero monete da egli raccolte. Come per le altre tipologie di misure, anche da ognuna di esse è stato possibile estrarre e calcolare un andamento medio, e una deviazione standard, mantenuti durante i 17 test associati. Sono così stati calcolati i seguenti risultati: Operation Speed con MD = 0.54 (SD = 0.36, intervallo [0,1]), Accuracy con MD = 0.47 (SD = 0.17, intervallo [0,1]), distanza percorsa dall'utente con MD = 3183.77 (SD = 3541.30) e numero di monete raccolte con valor medio MD = 124.06 (SD = 157.19) su un totale di 530.

5.4.10 Correlazioni

Dai dati precedenti, è stato inoltre possibile identificare correlazioni (calcolate con il metodo di Pearson) tra l'andamento dei risultati registrati. Ciò ha permesso, in questo scenario, di identificare:

- una correlazione negativa significativa tra l'esperienza pregressa degli utenti e la Total Severity registrata dall'SSQ ($r = –0.33$)
- una correlazione positiva tra il valore dell'MSSQ e la Total Severity dell'utente ($r = 0.33$)
- una correlazione positiva tra età del partecipante e punteggio della categoria di Nausea ottenuto dall'SSQ ($r = 0.26$)
- una correlazione negativa tra metrica di Operation Speed e Total Severity ($r = –0.35$)
- una correlazione negativa tra metrica di accuratezza e Total Severity ($r = –0.15$)
- una correlazione negativa tra il numero di monete raccolte e la Total Severity ($r = –0.45$)
- una correlazione negativa tra la distanza percorsa e la Total Severity ($r = –0.43$)
- una correlazione positiva tra la variazione del battito cardiaco e la Total Severity ($r = 0.47$)
- una correlazione negativa significativa tra tempo di completamento al VE e Total Severity ($r = –0.27$).

5.4.11 Discussione dei risultati dello scenario

A partire da tutti i dati ottenuti dalle singole misure oggettive, soggettive e di performance, possiamo trarre alcune interessanti conclusioni.

In primo luogo, dai valori medi normalizzati calcolati a partire dall'SSQ è possibile facilmente indicare come i sintomi appartenenti alla categoria di Nausea siano quelli maggiormente influenzati da questo scenario, seguiti da Oculomotor e Disorientation.

In secondo luogo, è possibile osservare come l'intensità media dei singoli sintomi e i punteggi delle categorie dell'SSQ risultino elevati, ottenendo, ad esempio, un punteggio di 60.94 su un totale di 235 per la Total Severity. Risulta, tuttavia, importante da osservare come il tempo medio di esposizione dell'utente in questo terzo scenario risulti il più elevato tra gli scenari di test: tale osservazione può suggerire, pertanto, che l'entità elevata dei sintomi percepiti sia la conseguenza di un'esposizione per un tempo maggiore al VE.

Un indice di intensità dei sintomi generati è fornito inoltre dai questionari che costituiscono le varianti all'SSQ: dal Total Score, normalizzato, del VRSQ (TS = 0.19) e dell'F-SSQ (TS = 0.22), è possibile infatti osservare un punteggio di intensità totale coerente con quanto riportato dall'SSQ (Total Severity = 0.24). Inoltre, osservando i risultati calcolati nel questionario CSQ, la maggiore intensità di sintomi di Dizziness rispetto a quelli della categoria Difficulty on focusing consente di specificare ulteriormente, secondo la lettura suggerita dal suo autore, come l'intensità della sickness generata sia di entità elevata e non trascurabile.

Infine, a partire dai dati anagrafici, oggettivi e dalle metriche di performance, uniti alle correlazioni indicate, è possibile osservare, come si ipotizzava, che ad un indice di esperienza pregressa maggiore è generalmente associata una minore sensazione di sickness, e, rispettivamente, ad un MSSQ RawScore maggiore, ovvero ad una suscettibilità maggiore, corrisponde generalmente un'intensità più elevata dei sintomi percepiti.

Secondariamente, la forte correlazione tra età e sintomi di nausea percepiti permette di osservare che gli utenti di età più avanzata sono risultati più proni a subire tale categoria di sintomi in intensità maggiore.

La correlazione negativa tra la metrica di Accuracy e la Total Severity può essere invece interpretata identificando una minore accuratezza nello svolgimento del task come conseguenza del presentarsi di sintomi elevati durante il test. Questo può inoltre essere osservato dalla forte correlazione negativa tra Operation Speed e Total Severity, in quanto tale valore indica che, mediamente, ad una maggiore velocità nello svolgere il task corrisponde una minore comparsa dei sintomi, evidenziando quindi un migliore svolgimento del task associato da parte del partecipante.

Inoltre, la correlazione negativa tra tempo di completamento e Total Severity permette di visualizzare come, generalmente, un utente che sta provando una sickness elevata spesso preferisca terminare anticipatamente l'esperienza virtuale piuttosto che proseguire e portarla eventualmente a terminazione. Rispettivamente, le correlazioni calcolate a partire dal numero di monete e dalla distanza percorsa forniscono un'informazione coerente a quanto osservato dal tempo di completamento: un utente che è riuscito a resistere per più tempo all'esposizione al VE, ha anche generalmente svolto meglio il task rispetto agli altri utenti (raccogliendo appunto più monete e percorrendo quindi una distanza maggiore nello scenario).

Infine, la correlazione positiva tra Total Severity e la variazione del battito cardiaco permette di osservare che, mediamente, ad una maggiore entità dei sintomi percepiti è

generalmente associato un aumento nel battito cardiaco dell'utente, che indica quindi che il corpo dell'utente è risultato sotto stress durante l'esecuzione del test.

5.5 Track race – Driving uphill/downhill

5.5.1 Composizione partecipanti

In questo ultimo scenario di test, sono stati effettuati 17 test su 11 partecipanti di sesso maschile e 6 di sesso femminile, con età media complessiva pari a 30.94 anni (SD = 13.36), punteggio di esperienza media pari a 2.74 (SD = 0.78) e MSSQ RawScore medio pari a 5.46 (SD = 3.85).

5.5.2 SSQ

I valori raccolti dalle risposte ai questionari SSQ, suddivisi nelle tre categorie di sintomi di Nausea, Oculomotor e Disorientation, e il valore della Total Severity per il singolo utente hanno permesso, come in precedenza, di calcolare un valore medio per ogni punteggio, in modo tale da ottenere una visione dell'andamento generale dei sintomi per lo scenario. Alla categoria di Nausea corrisponde un valore medio pari a MD = 70.44 nell'intervallo [0,200] (SD = 31.86); ad Oculomotor corrisponde un valore medio di MD = 48.16 nell'intervallo [0,159] (SD = 29.29); alla classe Disorientation, infine, corrisponde un punteggio medio di MD = 81.06 (intervallo [0,292], SD = 38.86); infine, alla Total Severity è associato un valor medio di MD = 75.46 nell'intervallo [0,235] (SD = 26.70).

Per ottenere una maggiore facilità di confronto tra le categorie, è inoltre calcolato il valor medio dei punteggi delle singole classi normalizzate nell'intervallo di appartenenza. Si ottengono così i seguenti valori: valor medio normalizzato di Nausea pari a $MD_{norm} = 0.35$, di Oculomotor pari a $MD_{norm} = 0.30$ e Disorientation pari a $MD_{norm} = 0.28$. Per la Total Severity, il valore medio normalizzato è risultato pari a $MD_{norm} = 0.32$.

5.5.3 VRSQ

Le risposte al questionario precedente consentono di calcolare, in questo secondo questionario, i punteggi relativi a due classi, Oculomotor e Disorientation, e il VRSQ Total Score, tutti calcolati nell'intervallo [0,100]. I risultati sono i seguenti:

- Oculomotor: MD = 34.31, SD = 20.59
- Disorientation: MD = 24.31, SD = 14.09
- VRSQ-TS: MD = 29.31, SD = 14.17

5.5.4 F-SSQ

Dall'SSQ ricaviamo inoltre i punteggi relativi alle classi di Nausea (intervallo [0,3]), Oculomotor (intervallo [0,3]) e il punteggio totale (intervallo [0,6]) di questa ulteriore variante del questionario. Otteniamo, in particolare, i seguenti valori:

- Nausea: MD = 1.18, SD = 0.39
- Oculomotor: MD = 1.02, SD = 0.47
- FSSQ-TS: MD = 2.20, SD = 0.59

È risultato inoltre necessario normalizzare tali valori per renderli confrontabili. Si ottengono così i seguenti risultati:

- Nausea: $MD_{norm} = 0.39$
- Oculomotor: $MD_{norm} = 0.34$
- FSSQ-TS: $MD_{norm} = 0.37$

5.5.5 CSQ

Si ottengono inoltre, a partire dai dati raccolti nell'SSQ, i punteggi relativi alle classi di Dizziness (intervallo [0,7.52]) e Difficulty in focusing (intervallo [0,5.66]) di quest'ultima variante del questionario. In particolare, si ottengono i valori non normalizzati di:

- Dizziness: MD = 2.90, SD = 1.51
- Difficulty in focusing: MD = 2.02, SD = 1.46

I quali, normalizzati, corrispondono ai seguenti punteggi:

- Dizziness: $MD_{norm} = 0.39$
- Difficulty in focusing: $MD_{norm} = 0.36$

5.5.6 Classifica sintomi per frequenza di apparizione

Una prima classificazione dei singoli sintomi registrati dagli utenti in questo scenario avviene secondo la frequenza in cui il singolo sintomo ha registrato un incremento di intensità durante i test. Per ogni utente, dall'SSQ è possibile infatti estrarre l'incremento relativo di ognuno dei 16 sintomi che compongono il questionario; per valutare la frequenza con cui si sono presentato i singoli sintomi, per ognuno di essi si effettua il conteggio degli incrementi con intensità non nulla. La massima frequenza corrisponde pertanto ad un incremento registrato in

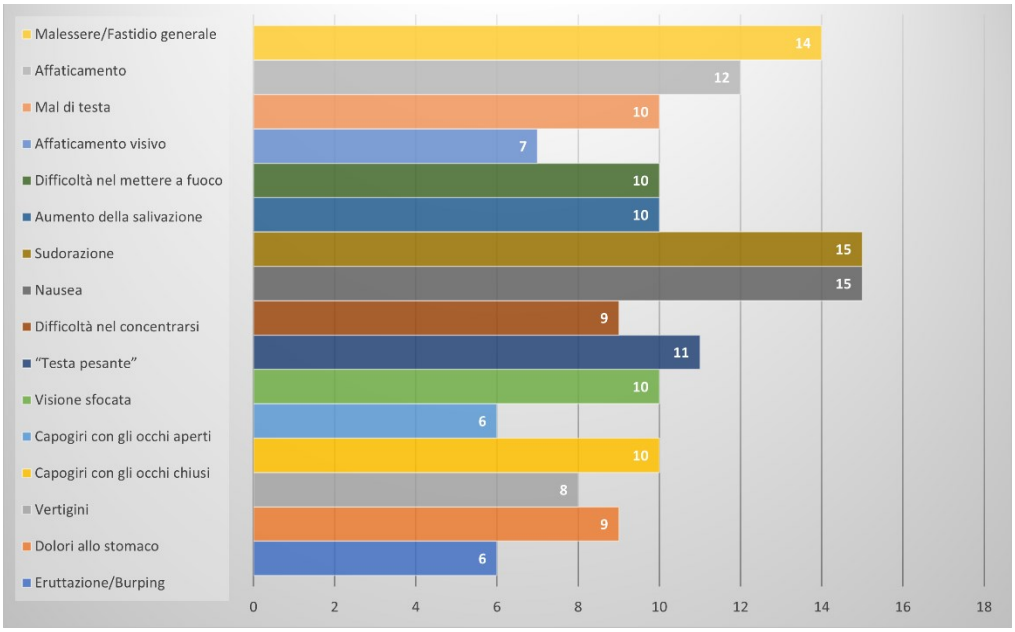


Figura 5.7: frequenza di apparizione dei sintomi nello scenario Track race

tutti i 17 test.

Come si può evincere da (Fig. 5.7), la frequenza maggiore è stata registrata nei sintomi di Sudorazione (f = 15/17), Nausea (f = 15/17), Malessere/Fastidio generale (f = 14/17) e Affaticamento (f = 12/17).

5.5.7 Classifica sintomi per intensità media

Dai valori ottenuti dalle risposte degli utenti al questionario SSQ è possibile, inoltre, classificare i sintomi in ordine di incremento medio dell'intensità tra tutti i test effettuati. Per il singolo utente, un sintomo può infatti incrementare la sua intensità di un valore incluso nell'intervallo [0,3], estremi inclusi.

Calcolando la media di questi valori trasversalmente su tutti gli utenti che hanno effettuato il test su questo scenario, si può quindi facilmente visualizzare e identificare una seconda classificazione dei sintomi, che, per l'appunto, tiene conto dell'intensità media registrata durante i test**.** Come visualizzato in (Fig. 5.8), i sintomi prevalenti in entità registrata sono in ordine Sudorazione (i = 1.65), Nausea (i = 1.71), Malessere/Fastidio generale (i = 1.35) e Affaticamento (i = 1.12).

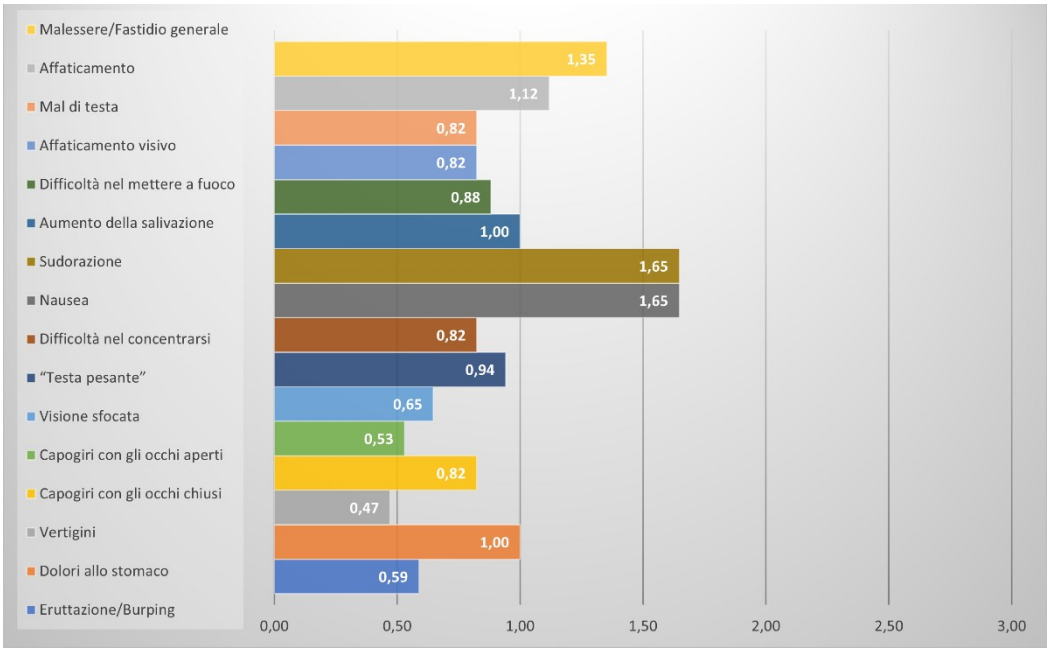


Figura 5.8: intensità media dei sintomi registrata nello scenario Track race

5.5.8 Misure oggettive

Per ogni test sono state estratte e calcolate due principali misure oggettive: il tempo di completamento e la variazione del battito cardiaco (ΔHR, pre- e post-test). Dai valori ottenuti per ogni test, quindi, è stato possibile il calcolo l'andamento medio e la deviazione standard di ambo le misure oggettive a partire da tutti i 17 test. Per questo scenario di test, in particolare, si è registrato un tempo di completamento medio pari a MD = 12 minuti e 02 secondi, con una deviazione standard pari a 7 minuti e 42 secondi (SD = 462.04 secondi), e un ΔHR medio pari a MD = -1.00 (SD = 10.47).

Infine, i test realizzati sono stati suddivisi tra test terminati prematuramente e test portati al completamento. Ciò ha permesso di calcolare, in questo scenario, una percentuale di interruzioni anticipate pari al 66.67%.

5.5.9 Prestazioni

Alla terminazione del singolo test, l'applicazione fornisce un report (un file .csv) in cui sono riportate le misure di performance registrate per l'utente corrispondente.

Le misure registrate in questo scenario sono in particolare Operation Speed, Accuracy, la metrica di errore (Errors) e la distanza percorsa dall'utente durante il test. Come per le altre tipologie di misure, anche da ognuna di esse è stato possibile estrarre e calcolare un andamento medio, e una deviazione standard, mantenuti durante i 17 test associati. Sono così stati calcolati i seguenti risultati: Operation Speed con MD = 0.78 (SD = 0.12, intervallo [0,1]), Accuracy con MD = 0.45 (SD = 0.34, intervallo [0,1]), Errors con MD = 0.10 (SD = 0.09) e distanza percorsa dall'utente con MD = 11664.82 (SD = 8961.49).

5.5.10 Correlazioni

Dai dati precedenti, è stato inoltre possibile identificare correlazioni (calcolate con il metodo di Pearson) tra l'andamento dei risultati registrati. Ciò ha permesso, in questo scenario, di identificare:

- una correlazione positiva tra età del partecipante e punteggio della categoria di Nausea ottenuto dall'SSQ ($r = 0.48$)
- una correlazione negativa tra età del partecipante e punteggio della categoria di Disorientation ottenuto dall'SSQ ($r = –0.20$)
- una correlazione negativa tra metrica di Accuracy e Total Severity ($r = -0.64$)
- una correlazione negativa elevata tra distanza percorsa e Total Severity ($r = -0.41$)
- una correlazione positiva significativa tra metrica di Errors e Total Severity ($r = 0.42$)
- una correlazione negativa significativa tra il tempo di completamento e Total Severity ($r = -0.27$)

5.5.11 Discussione dei risultati dello scenario

A partire da tutti i dati ottenuti dalle singole misure oggettive, soggettive e di performance, possiamo trarre alcune interessanti conclusioni.

In primo luogo, dai valori medi normalizzati calcolati a partire dall'SSQ è possibile facilmente indicare come i sintomi appartenenti alla categoria di Nausea siano quelli maggiormente influenzati da questo scenario, seguiti da Oculomotor e Disorientation.

In secondo luogo, è possibile osservare come l'intensità media dei singoli sintomi e i punteggi delle categorie dell'SSQ risultino elevati, ottenendo, ad esempio, un punteggio di 75.46 su un totale di 235 per la Total Severity (ricordando che, come riportato dall'autore del questionario, ai sintomi fastidiosi e non trascurabili corrisponde un punteggio nell'intervallo [20,100]).

Un indice simile di intensità dei sintomi generati è fornito dai questionari che costituiscono le varianti all'SSQ: dal Total Score, normalizzato, del VRSQ (TS = 0.29) e dell'F-SSQ (TS = 0.27), è possibile infatti osservare un punteggio di intensità totale coerente con quanto riportato dall'SSQ (Total Severity = 0.32, anch'esso normalizzato per facilitare il confronto). Inoltre, osservando i risultati calcolati nel questionario CSQ, la maggiore intensità di sintomi di Dizziness rispetto a quelli della categoria Difficulty on focusing consente di specificare ulteriormente, secondo la lettura suggerita dal suo autore, come l'intensità della sickness generata sia di entità elevata e non trascurabile.

Infine, a partire dai dati anagrafici, oggettivi e dalle metriche di performance, uniti alle correlazioni indicate, è possibile osservare come gli utenti di età più avanzata siano risultati più proni a subire un'intensità maggiore nei sintomi appartenenti alla categoria di Nausea, e, rispettivamente, sintomi di entità minore tra quelli appartenenti alla classe di Disorientation.

La forte correlazione negativa tra la metrica di Accuracy e la Total Severity può essere invece interpretata identificando una minore accuratezza nello svolgimento del task come conseguenza del presentarsi di sintomi elevati durante il test. Similarmente, la correlazione positiva tra errori e Total Severity permette di evidenziare come un utente che ha commesso un numero elevato di errori (collisioni con gli ostacoli ad esempio) abbia più facilmente subito sintomi di sickness di maggiore intensità.

Infine, l'elevata correlazione negativa tra tempo di completamento e Total Severity permette di visualizzare come, generalmente, un utente che sta provando una sickness elevata spesso preferisca terminare anticipatamente l'esperienza virtuale piuttosto che proseguire e portarla eventualmente a terminazione.

5.6 Confronto tra gli scenari

Dopo aver esaminato i risultati ottenuti considerando gli scenari di test nella loro individualità, in questo paragrafo viene effettuato un confronto tra essi in termini di intensità della cybersickness generata sugli utenti di test. Per effettuare tale confronto, vengono utilizzati i risultati del questionario F-SSQ (Nausea, Oculomotor e F-SSQ Total Score), in quanto è quello

che, secondo la letteratura, meglio descrive e meglio si adatta agli scenari di utilizzo della VR [47,53].

In primo luogo, a partire dalla differente entità e influenza dei fattori funzionali che costituiscono i singoli scenari è stato possibile ipotizzare, a priori dai risultati effettivi, una prima classifica degli scenari in termini di intensità della cybersickness generabile negli utenti. La formulazione di questa ipotesi è stata possibile tramite un semplice procedimento, che ha permesso di mettere meglio in luce le caratteristiche di ogni scenario. Ad ogni fattore funzionale, per ogni scenario, si è attribuito un punteggio numerico (nell'intervallo intero [1,3]); tale valore intero indica l'influenza che il fattore associato avrebbe, in teoria, sulla sensazione di sickness percepita dagli utenti: al valore 1 corrisponde l'influenza minima, mentre al valore 3 quella massima. Per ogni scenario, si è quindi calcolata la somma dei numeri associati ai singoli fattori; il valore risultante, fornendo un indice totale della gravità di tali fattori, ha consentito quindi di ipotizzare e predire in anticipo un ordinamento atteso degli scenari, identificando quello con la somma maggiore come lo scenario che più di tutti risulterebbe in grado di causare sintomi di intensità elevata.

I fattori funzionali utilizzati per classificare gli scenari sono in totale dieci, e sono stati identificati a partire dalla letteratura [50,51,52]; essi sono:

1. grado di controllo dell'utente sul suo moto all'interno del VE;
2. frequenza delle rotazioni della testa del partecipante durante l'esecuzione del task;
3. numero di assi cartesiani lungo i quali avvengono le rotazioni durante il moto;
4. frequenza con cui avvengono accelerazioni e decelerazioni durante il movimento;
5. velocità con cui l'utente si muove all'interno della scena VR;
6. densità degli oggetti virtuali presenti in media nel campo visivo dell'utente;
7. altezza media dal suolo virtuale, alla quale avvengono i movimenti;
8. durata dell'esposizione all'esperienza VR;
9. fedeltà e realismo dei dettagli e dei modelli 3D utilizzati nello scenario;
10. posizione mantenuta dall'utente nel mondo reale durante l'esecuzione del test (seduto o in piedi).

La classifica realizzata a priori, a partire dall'analisi degli elementi funzionali degli scenari, è stata quindi posta in relazione alla classifica effettiva, ottenuta sulla base dei risultati empirici dei test: ciò ha consentito quindi di confermare l'ipotesi, confermando con solidità quale tra gli scenari proposti risulti quello più *cybersickness-inducing*, ovvero quello che risulta in grado di suscitare il maggior quantitativo di sintomi inattesi negli utenti VR.

Tali conferme risultano infine consolidate da analisi statistiche effettuate sui risultati ottenuti dal questionario F-SSQ, realizzate per dimostrare analiticamente la significatività statistica delle differenze registrate nei singoli scenari del testbed.

Nei paragrafi che seguono, l'ipotesi, le conferme empiriche e le analisi statistiche vengono trattate presentate in maniera dettagliata.

5.6.1 Ipotesi

L'ipotesi formulata, seguendo il procedimento anticipato nel paragrafo precedente, pone le sue fondamenta sulle caratteristiche funzionali e operazionali che costituiscono la realizzazione e la logica di funzionamento per gli scenari che compongono il testbed. In base a tali caratteristiche, è stato pertanto possibile associare ad ogni fattore funzionale un punteggio intero in grado di identificare il grado di influenza che dovrebbe avere il singolo fattore sul punteggio finale registrato poi dai test effettivi.

Il primo fattore, il grado di controllo (o *Degree of control*) indica la possibilità per l'utente di controllare a proprio piacimento i movimenti all'interno del VE. Secondo Stanney et al. [54], si possono distinguere tre gradi di controllo differenti:

- controllo passivo: l'utente non ha possibilità di variare o decidere le caratteristiche del suo moto all'interno del VE, ma assiste ad esso nei panni di un osservatore-passeggero. Questo grado di controllo è quello che rispecchia una maggiore influenza sui sintomi generati negli utenti: un utente con meno controllo sul proprio moto, subirà generalmente sintomi di cybersickness in entità maggiore.
- controllo attivo: l'utente è in grado di cambiare direzione di movimento con sei o più gradi di libertà; la quasi totale libertà di movimento consente agli utenti di minimizzare i sintomi (laddove dovuti a questo fattore) e, pertanto, si rispecchia in un'influenza sui sintomi di entità minore, ma comunque maggiore rispetto al controllo attivo-passivo.
- controllo attivo-passivo: l'utente virtuale può effettuare movimenti solamente lungo un asse cartesiano alla volta (ad esempio, salire/scendere, avanti/indietro); il grado di controllo è quindi maggiore di quello passivo, ma al contempo minore di quello attivo. In tali condizioni di controllo, Stanney et al. [54] hanno osservato, a partire da risultati ottenuti in alcuni test, che corrisponde l'influenza minima sulla sickness tra le tre condizioni di controllo.

In base a tali osservazioni, per il fattore di Degree of control, allo scenario Rollercoaster è stata associata l'influenza massima (entità $e = 3$), al Tower defense quella minima ($e = 1$, in quanto l'utente ha controllo attivo-passivo sui movimenti). Al Viking village e al Track race, invece, è stata associata un'entità dell'influenza intermedia, dovuta alla presenza di grado di controllo attivo ($e = 2$) (T. 5.9, riga 1).

Il secondo fattore, *head movement rate*, indica la frequenza con cui uno scenario suscita rotazioni della testa e della visuale dell'utente durante l'esperienza VR. Ad un maggiore numero di rotazioni imposte, corrisponde generalmente un'intensità maggiore di cybersickness [50]. Per quanto riguarda gli scenari, il Tower defense è quello che è stato realizzato più di tutti con la finalità di causare rotazioni repentine della visuale: ad esso viene quindi associata l'entità massima nell'influenza ($e = 3$). L'influenza minima è invece associata allo scenario Viking village ($e = 1$), in quanto le rotazioni imposte all'utente sono minime e avvengono con frequenza molto bassa in tutta la durata dell'esperienza. Al Rollercoaster e al Track race, invece, è associato un grado di influenza di media entità ($e = 2$) in quanto, in termini di frequenza di rotazioni della visuale, si trovano in uno stadio intermedio tra gli scenari precedenti (T. 5.9, riga 2).

Il terzo fattore, *number of rotational axis,* indica il numero effettivo di assi cartesiani lungo i quali avvengono le rotazioni della visuale dell'utente durante l'esecuzione dell'applicativo. Maggiore è il numero di assi, maggiore risulta la cybersickness suscitata sui soggetti [50]. Seguendo queste indicazioni, allo scenario Viking village è attribuita l'influenza minore in termini di tale fattore (e = 1), poiché in esso le rotazioni della visuale avvengono principalmente lungo l'asse verticale. Al Tower defense è invece associata l'influenza intermedia (e = 2), in quanto durante l'esecuzione all'utente è richiesto di ruotare la visuale lungo l'asse verticale (ruotando la pedana su cui si trova) e lungo l'asse orizzontale (su/giù, per visualizzare correttamente i bersagli terreni e volanti). Infine, in Rollercoaster e Track race si osservano tre assi di rotazione differenti, e ad essi è quindi attribuita l'influenza massima (e = 3) (T. 5.9, riga 3).

Per quanto riguarda il fattore *linear/rotational acceleration rate*, esso identifica la frequenza con la quale avvengono accelerazioni e decelerazioni durante il movimento dell'utente. Ad una maggiore frequenza nelle variazioni, generalmente corrisponde una maggiore sickness percepita [50]. I valori minimi di entità sono associati agli scenari Tower defense e Viking village, in quanto in essi l'utente è principalmente stazionario o si muove con velocità pressoché costante (e = 1). Il valore di influenza intermedio (e = 2) è invece attribuito al Track race, poiché in esso avvengono accelerazioni e decelerazioni con frequenza moderata, laddove nel Rollercoaster esse risultano in frequenza decisamente maggiore a causa della presenza repentina (e = 3), durante il moto, di salite e discese a breve distanza l'una dalle altre (T. 5.9, riga 4).

Un ordinamento simile si può osservare anche per quanto riguarda il fattore funzionale di *self-movement speed*, ovvero, la velocità media con cui avviene il moto dell'utente all'interno del VE. Osservando che a velocità maggiori sono generalmente associati sintomi di intensità maggiore [50], agli scenari Viking village e Tower defense è attribuita l'entità di influenza minima (e = 1), poiché l'utente si muove a velocità ridotte (pari alla velocità di camminata nel mondo reale) o risulta stazionario; al Rollercoaster è invece associata l'influenza massima (e = 3), in quanto il movimento dell'utente avviene a velocità molto elevate (ad esempio, nei tratti in discesa del tragitto). Infine, al Track race è associato il valore intermedio (e = 2), essendo uno scenario a velocità maggiore dei primi due, ma minore di quella riscontrabile nel Rollercoaster (T. 5.9, riga 5).

Al fattore *scene density*, ovvero la densità di oggetti virtuali presenti in media nel campo visivo dell'utente, corrisponde un ordinamento differente degli scenari. La densità della scena nello scenario Tower defense è minima, essendovi un numero ridotto di oggetti virtuali nelle prossimità dell'utente; ragionamento simile si può effettuare per lo scenario Track race. Un numero moderatamente maggiore di elementi virtuali visibili nel campo visivo dell'utente è invece riscontrabile nello scenario Rollercoaster (rotaie, carrello, cartelloni ed elementi ornamentali sono sempre visibili dall'utente in ogni istante del moto). Infine, la densità della scena risulta maggiore nello scenario Viking village, in quanto l'utente si trova all'interno di ambienti spesso ristretti e colmi di elementi ornamentali nelle sue immediate vicinanze. Secondo differenti studi [50,51], ad una densità di scena maggiore corrispondono sintomi più frequenti e di intensità maggiore suscitati negli utenti. Sfruttando tale considerazione, possiamo attribuire agli scenari le seguenti entità: Viking village entità massima (e = 3), Rollercoaster influenza intermedia (e = 2) e, a parimerito, Tower defense e Track race con entità minima (e = 1) (T. 5.9, riga 6).

È stato osservato, inoltre, come una maggiore altitudine media rispetto al suolo virtuale influisca negativamente, in termini di Total Score, sulla cybersickness registrata negli utenti [50]. Pertanto, l'altitudine nello scenario Rollercoaster, essendo la maggiore tra i quattro scenari, risulta quella di minore influenza sui sintomi (e = 1); nel Tower defense l'utente, sebbene sia sollevato dal suolo per tutta la durata del test, risulta tuttavia ad altezze minori rispetto allo scenario precedente: in base a ciò, si è attribuita l'entità media (e = 2). Infine, in Viking village e Track race l'utente si muove costantemente sul suolo stesso, ad altitudine circa pari a zero, e pertanto l'influenza del fattore associato risulterà massima (e = 3) (T. 5.9, riga 7).

L'ottavo fattore funzionale considerato consiste invece nella durata di esposizione dell'utente alla scena virtuale. Un numero elevato di studi ha infatti dimostrato come a periodi di esposizione maggiori corrisponda quasi sempre un'intensità dei sintomi generalmente maggiore per gli individui immersi nel VE [50,51]. I tempi di esposizione minimi sono riscontrabili negli scenari Rollercoaster e Tower defense: ad essi è quindi associata l'entità minima di influenza (e = 1). Ai restanti scenari, invece, è attribuito il grado di influenza massimo (e = 3), poiché di durata attesa comparabile e molto maggiore rispetto ai precedenti (T. 5.9, riga 8).

La fedeltà e il realismo delle texture e dei modelli 3D utilizzati costituiscono anch'essi un fattore in grado di influenzare negativamente l'esperienza dell'utente. Generalmente, infatti, scene indicativamente più realistiche suscitano maggiori malesseri e sintomi nei soggetti [50,51]. Si può pertanto attribuire allo scenario Viking village, a causa della qualità più elevata di modelli e texture applicate, il grado di influenza maggiore in termini di fedeltà (e = 3), seguito da Rollercoaster e Track race (entrambi con e = 2); infine, per la maggiore semplicità di modelli e texture, allo scenario Tower defense si può attribuire l'influenza minore (e = 1) (T. 5.9, riga 9).

L'ultimo fattore, identificato da Zielasko et al. [52], attribuisce, invece, alla posizione mantenuta nel mondo reale dall'utente, durante l'esperienza, un'influenza differente, distinguendo nei due casi di utente seduto e utente in piedi. Secondo tale studio, un soggetto che sperimenta la VR in posizione seduta subisce in genere sintomi minori rispetto agli individui immersi nel VE mentre risultano in piedi nel mondo reale. Agli scenari è stato pertanto associato un grado di influenza minimo (e = 1) in caso di posizione seduta (Rollercoaster e Track race), mentre un'entità maggiore (e = 2) è stata attribuita a quelli in cui l'utente risulta in piedi (Viking village e Tower defense) (T. 5.9, riga 10).

A partire dai valori associati, per ogni fattore, ai quattro scenari che compongono il testbed è stato quindi possibile formulare a priori un'ipotesi riguardante l'ordinamento di tali scenari in termini di sickness suscitabile negli utenti, identificando quindi lo scenario che più di tutti dovrebbe risultare in grado di generare la cybersickness negli individui immersi nella VR. L'ordinamento è stato ottenuto effettuando la somma (s) dei valori di ogni fattore per il singolo scenario, e confrontando poi tali risultati tra loro. Secondo tali confronti, l'ipotesi formulata identifica gli scenari Rollercoaster e Track race, a parimerito (s = 21), come quelli che risulterebbero maggiormente in grado di generare i sintomi di cybersickness negli utenti virtuali; ad essi seguono, in ordine, il Viking village (s = 20) e, infine, il Tower defense (s = 15) (T. 5.9, riga 11). Si ipotizza, inoltre, confrontando tali somme con il valore massimo dell'influenza totale (pari

a 30), che l'intensità della cybersickness suscitabile negli utenti risulti non trascurabile e, generalmente, di entità elevata.

Tabella 5.9: influenza dei singoli fattori funzionali sui quattro scenari di test, e influenza totale per ognuno di essi

Fattore funzionale	Scenario Rollercoaster	Scenario Tower defense	Scenario Viking village	Scenario Track Race
Degree of control	3	1	2	2
Head movement rate	2	3	1	2
Number of rotational axis	3	2	1	3
Linear/rotational acceleration rate	3	1	1	2
Self-movement speed	3	1	1	2
Scene density	2	1	3	1
Mean altitude above terrain	1	2	3	3
Duration	1	1	3	3
Fidelity	2	1	3	2
Sitting/Standing	1	2	2	1
Influenza totale	21	15	20	21

5.6.2 Risultati empirici

In questo paragrafo, le ipotesi formulate sono messe in confronto e validate a partire dai dati ricavati dai test effettuati sugli utenti volontari.

In primo luogo, i risultati ottenuti dal questionario SSQ per i quattro scenari ci permettono di convalidare la seconda ipotesi. In base a tale ipotesi, infatti, l'entità della cybersickness suscitata nei soggetti non risulterebbe trascurabile, sebbene di intensità differente tra i singoli scenari; questa affermazione risulta confermata dai valori medi ricavati dai punteggi dei SSQ-Total Severity, che risultano tutti superiori alla soglia Total $Severity_{min}$= 20 (valore normalizzato nell'intervallo di appartenenza pari a 0.08) la quale è posta come limite tra i punteggi che corrispondono a entità di cybersickness trascurabili (Total Severity<20) e non trascurabili (Total Severity>=20) [15,44]: per il Rollercoaster si è infatti ottenuta una Total Severity media pari a MD_{norm} = 0.36 (MD = 83.82, SD = 4.77), per il Tower defense Total Severity con MD_{norm} = 0.18 (MD = 41.36, SD = 20.65), per il Viking village Total Severity media uguale a MD_{norm} = 0.24 (MD = 55.44, (SD = 28.11) e, infine, Track race con media della Total Severity MD_{norm} = 0.32 (MD = 75.46, SD = 26.70) (T. 5.10, riga 4).

Inoltre, i risultati raccolti tramite il questionario CSQ, opportunamente normalizzati nell'intervallo dei valori di appartenenza, permettono di distinguere gli scenari in cui i sintomi registrati sono risultati di intensità medio-elevata (se il punteggio della categoria Dizziness, normalizzato, è maggiore del punteggio di Difficulty in focusing) da quelli in cui i sintomi presentano intensità leggera (Difficulty in focusing maggiore di Dizziness) [48]. Come illustrato in T. 5.11 (righe 8 e 9), il punteggio di Dizziness risulta il maggiore, tra le due classi del CSQ, negli scenari Rollercoaster, Viking village e Track race, delineando tali scenari come esperienze in

grado di generare sintomi di entità medio-elevata e non trascurabili (secondo i risultati dell'SSQ illustrati in precedenza), mentre nello scenario Tower defense prevale il punteggio della classe di Difficulty in focusing, evidenziando pertanto sintomi più leggeri rispetto ai precedenti, ma al contempo ugualmente non trascurabili, essendo la SSQ - Total Severity superiore alla soglia di trascurabilità.

Un'ulteriore osservazione formulabile a partire dai dati raccolti riguarda, inoltre, i sintomi che hanno registrato maggiore intensità (media) nei quattro scenari: si osserva, in particolare, che i sintomi di Malessere generale, Sudorazione e Nausea risultano quelli preponderanti, seguiti da Affaticamento, Difficoltà nel concentrarsi e Affaticamento visivo (T. 5.10, riga 10). Tali sintomi, ad eccezione dell'ultimo nell'elenco, appartengono tutti alla categoria di sintomi di Nausea, indicando una maggiore incidenza di questa categoria della cybersickness rispetto alle restanti Oculomotor e Disorientation, coerentemente con quanto evidenziato da Bouchard et. al [53].

Tabella 5.10: confronto tra i valori risultanti (normalizzati nell'intervallo di appartenenza) dei questionari SSQ, F-SSQ e CSQ, e confronto tra i sintomi di maggiore intensità registrati nei quattro scenari (Rollercoaster, Tower defense, Viking village, Track race)

	Rollercoaster	Tower defense	Viking village	Track race
SSQ – Nausea	0.43	0.18	0.34	0.35
SSQ – Oculomotor	0.32	0.19	0.20	0.30
SSQ – Disorientation	0.31	0.16	0.17	0.28
SSQ – Total Severity	0.36	0.18	0.24	0.32
F-SSQ – Nausea	0.45	0.20	0.32	0.39
F-SSQ – Oculomotor	0.34	0.20	0.23	0.34
F-SSQ – Total Score	0.39	0.20	0.27	0.37
CSQ – Dizziness	0.44	0.22	0.29	0.39
CSQ – Difficulty in focusing	0.33	0.29	0.15	0.36
Sintomi di maggiore intensità	Malessere generale, Nausea, Sudorazione, Difficoltà nel concentrarsi	Sudorazione, Affaticamento visivo, Malessere generale, Nausea	Malessere generale, Sudorazione, Nausea, Affaticamento	Sudorazione, Nausea, Malessere generale, Affaticamento

Per quanto riguarda l'ipotesi principale, l'ordinamento degli scenari di test in base all'intensità di sickness da essi generata corrisponde pienamente a quanto si era ipotizzato basandosi sulle caratteristiche funzionali di ognuno di essi. Tale osservazione viene effettuata a partire dai punteggi medi (normalizzati tra 0 e 1) ottenuti dal calcolo dei risultati relativi al Total Score del questionario F-SSQ (T. 5.10, riga 7). L'ordinamento fornito da questi risultati indica come lo scenario Rollercoaster sia risultato quello che ha generato maggiori malesseri e sintomi di cybersickness negli utenti (F-SSQ_TS_{norm} = 0.39); ad esso segue, per intensità, lo scenario Track race, il cui total score non si distanza, tuttavia, di molto rispetto a quello dello scenario precedente (F-SSQ_TS_{norm} = 0.37), come verrà evidenziato nel paragrafo successivo. In terza posizione nella classifica dell'intensità totale si trova poi lo scenario Viking village (F-SSQ_TS_{norm} = 0.27), seguito infine dall'ultimo classificato, il Tower defense (F-SSQ_TS_{norm} = 0.20) (Fig. 5.11, colonna 3).

Laddove nell'ipotesi di partenza si era potuta formulare e identificare una classifica a priori solamente per quanto riguarda il Total Score, dai risultati ottenuti viene messo in luce come la stessa classificazione e lo stesso ordinamento per entità avvengono, in maniera del tutto similare, nei punteggi ricavati nelle due categorie di sintomi di nausea e oculomotori (T. 5.10, righe 5 e 6). Per la categoria di nausea risulta infatti che lo scenario Rollercoaster sia quello in cui si è registrata la maggiore intensità dei sintomi (F-SSQ_N_{norm} = 0.45), seguito nuovamente dal Track race (F-SSQ_N_{norm} = 0.39), dal Viking village (F-SSQ_N_{norm} = 0.32) e, infine, dal Tower defense (F-SSQ_N_{norm} = 0.20). Ordinamento del tutto identico è pertanto ritrovabile anche nella categoria Oculomotor: Rollercoaster (F-SSQ_O_{norm} = 0.34) a parimerito con Track race (F-SSQ_O_{norm} = 0.34), seguiti da Viking village (F-SSQ_O_{norm} = 0.23) e, ultimo, il Tower defense (F-SSQ_O_{norm} = 0.20).

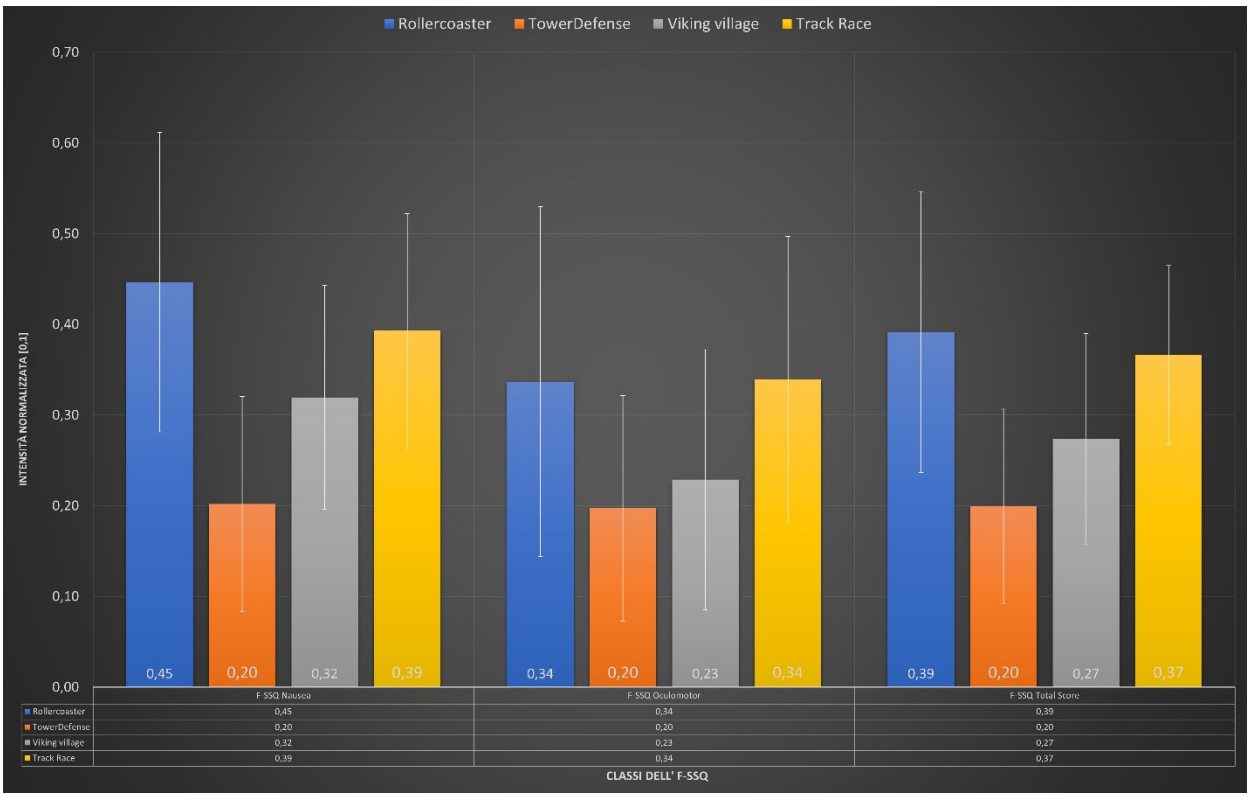


Figura 5.11: istogramma che mostra il confronto tra i risultati empirici ottenuti dai test sui quattro scenari del testbed (tramite F-SSQ)

5.6.3 Analisi statistiche

Con la finalità di dimostrare, in termini statistici, che le differenze registrate nelle intensità ricavate dai test sui quattro scenari risultino significative, sono state effettuate alcune analisi statistiche tramite il plugin Real Statistics di Excel.

Per ogni categoria dei risultati (Total Score, Nausea, Oculomotor), i valori dei singoli *sample* sono stati suddivisi in quattro gruppi, corrispondenti ai quattro scenari realizzati. Essi sono indicati dalle seguenti sigle:

- RC: scenario Rollercoaster
- TD: scenario Tower Defense
- VV: scenario Viking village
- TR: scenario Track race.

In primo luogo, è stata effettuata una rimozione dei valori identificati come outlier sfruttando il metodo basato sull'IQR (*interquartile range* o "scarto interquartile"). In base a tale metodo, i valori superiori alla soglia UP = Q3 + 1.5*IQR e inferiori alla soglia DOWN = Q1 – 1.5*IQR sono stati scartati e non considerati quindi nei calcoli delle analisi statistiche, in quanto outlier.

Successivamente, è stato effettuato il test di Shapiro-Wilk per verificare la normalità della distribuzione dei campioni raccolti, appartenenti ai singoli gruppi di ogni categoria dell'F-SSQ. Tutte le distribuzioni dei campioni sono risultate normali: ciò ha pertanto consentito di svolgere l'analisi della varianza dei campioni tramite ANOVA (per la singola categoria, con quattro gruppi) e test t di Student (per le coppie di distribuzioni), piuttosto che tramite i test non parametrici di Kruskal-Wallis e Mann-Whitney.

La spiegazione procede ora in ordine di categoria di risultati dell'F-SSQ.

Per la prima categoria di sintomi, ovvero la nausea (punteggio identificato da "N"), l'analisi tramite ANOVA ha permesso di dimostrare e osservare come i risultati ottenuti nei quattro scenari in questa categoria presentino differenze intrinseche statisticamente significative, non dovute pertanto al caso (p-value = $4.7 * 10^{-5} < 0.05$). La significatività statistica riscontrata da ANOVA ha quindi permesso di valutare la significatività delle differenze tra coppie di scenari (sei coppie possibili: RC-TD, RC-VV, RC-TR, TD-VV, TD-TR, VV-TR). I risultati permettono di identificare le seguenti differenze statistiche significative tra gli scenari, laddove combinati con i risultati empirci (descritti nel paragrafo precedente) (T. 5.12, riga 1):

1. Tra gli scenari TD (N = 0.61) e RC (N = 1.34), con p-value = $4.2 * 10^{-5} < 0.05$
2. Tra RC (N=1.34) e VV (N=0.86), con p-value = $0.0026 < 0.05$
3. Tra TD (N=0.61) e VV (N=0.86), con p-value = $0.035 < 0.05$
4. Tra TD (N=0.61) e TR (N=1.18), p-value = $0.0001 < 0.05$
5. Tra VV (N=0.86) e TR (N=1.18), p-value = $0.014 < 0.05$.

Tali risultati permettono di consolidare, statisticamente, l'ordinamento degli scenari effettuato in base ai valori di intensità registrati dai test sugli utenti. In particolare, è possibile affermare che lo scenario RC causi più sintomi di nausea dello scenario TD e dello scenario VV, che lo scenario VV causi più sintomi di nausea di TD e meno di TR, e che il TD generi meno sintomi di tale categoria dello scenario TR. In particolare, la maggiore intensità dei sintomi di nausea riscontrata nello scenario RC (N = 1.34) può essere spiegata a partire dalle sue caratteristiche funzionali (T. 5.9): la quasi totale assenza di controllo sul movimento, insieme alle elevate velocità, alle accelerazioni e decelerazioni molto frequenti, e alla presenza di tre assi di rotazione differenti sono probabilmente le caratteristiche funzionali che più hanno influenzato la maggiore intensità dei sintomi riscontrati. Tali fattori presentano invece un'influenza molto minore negli scenari che presentano differenze significative rispetto a RC, ovvero TD (N = 0.61, p-value < .001) e VV (N = 0.86, p-value = .003): in essi, ad esempio, non sono presenti movimenti a velocità elevate o accelerazioni improvvise, e presentano meno assi di rotazione e più controllo sui movimenti.

Tuttavia, la differenza tra lo scenario RC e TR, avendo un valore p-value = 0.32 > 0.05, non risulta statisticamente significativa: non è infatti possibile affermare che questi due scenari siano tra loro differenti, e ciò può essere facilmente osservato a partire dai risultati profondamente similari ottenuti dai test e da quanto valutato a priori in base ai fattori funzionali che caratterizzano ambo gli scenari (ai quali, nell'ipotesi formulata, corrispondeva lo stesso valore di influenza totale pari a 21): ad entrambi, ad esempio, sono associate rotazioni della visuale lungo tutti e tre gli assi cartesiani, e principalmente movimenti a velocità elevate e frequenti accelerazioni e decelerazioni durante l'esperienza, mentre differiscono principalmente in termini di controllo dell'utente sui movimenti effettuati. Tale differenza può spiegare la differente intensità media registrata nei test effettuati (RC-N = 1.34, TR-N = 1.18).

Secondo le analisi è quindi possibile fornire, per la categoria di nausea, il seguente ordinamento, decrescente in termini di intensità registrata: RC e TR a parimerito, VV e, infine, TD.

Per quanto riguarda la seconda categoria di sintomi (oculomotori, "O"), l'analisi con ANOVA ha nuovamente identificato differenze statisticamente significative tra i quattro scenari (p-value = 0.014 < 0.05).

L'analisi delle significatività a coppie di scenari, tramite il test t, ha messo in luce i seguenti risultati (T. 5.12, riga 2):

1. Tra scenari RC (O=1.01) e TD (O=0.54) vi è una differenza significativa (p-value = 0.01 < 0.05)
2. Tra scenari RC (O=1.01) e VV (O=0.69) vi è una differenza vicina al valore di soglia (p-value = 0.083 > 0.05)
3. Tra RC (O=1.01) e TR (O=1.02), il p-value = 0.97 > 0.05 identifica invece che non sia in alcun modo possibile distinguere i due scenari e quindi definirli "differenti" in termini di sintomi oculomotori

4. Tra TD (O=0.54) e VV (O=0.69), il p-value = 0.30 > 0.05 permette di definire anche questa coppia di scenari come non differenti tra loro per sintomi oculomotori
5. Tra TD (O= 0.54) e TR (O=1.02), vi è una forte differenza significativa (p-value = 0.0028 < 0.05)
6. Tra VV (O=0.69) e TR (O=1.02), infine, vi è un'ulteriore differenza significativa (p-value = 0.047 < 0.05)

Tali valori risultati dalle analisi, pertanto, non consentono di ottenere un ordinamento preciso come nella categoria di sintomi precedente; ciò che si può osservare, in quanto confermato a livello statistico, è solamente il fatto che gli scenari RC e TR, non dissimili tra loro in termini di differenze e di intensità media, generano un'entità di sintomi oculomotori maggiori dei restanti VV e TD (anch'essi privi di differenze statistiche significative). L'intensità maggiore dei sintomi oculomotori riscontrata nello scenario RC (O = 1.01) trae probabilmente origine dalla presenza di frequenti rotazioni della visuale dell'utente, necessarie per visualizzare correttamente i cartelloni che indicano la sequenza di tasti associata al task, alle numerose rotazioni e accelerazioni lungo tutti e tre gli assi cartesiani e alla densità (moderata) degli oggetti virtuali presenti nel campo visivo dell'utente. Considerazioni simili possono essere effettuate per lo scenario TR (O = 1.02), la cui intensità media dei sintomi oculomotori registrati risulta pressoché coincidente con quella di RC, rispetto al quale non presenta alcuna differenza significativa (p-value = 0.97): in particolare, in questo secondo scenario, insieme ai fattori funzionali precedenti, è inoltre presente una maggiore durata dell'esperienza, che ha come conseguenza diretta un maggiore aumento dell'intensità dei sintomi oculomotori, bilanciando la minore densità di oggetti virtuali presenti nel campo visivo dell'utente (rispetto a RC). Negli scenari VV (O = 0.69) e TD (O = 0.54), invece, nonostante presentino il primo densità e fedeltà elevate degli elementi presenti nel VE e durata elevata, e il secondo la frequenza maggiore, tra gli scenari, di rotazione della visuale dell'utente e due assi di rotazione, la velocità di movimento dell'utente e la frequenza di accelerazioni e decelerazioni risultano invece molto ridotte, soprattutto se confrontate con quelle presenti nei restanti scenari. Tale differenza spiega probabilmente perché l'intensità dei sintomi registrata risulti minore rispetto a quella ricavata in RC e TR, indicando come fattore di maggiore influenza nei sintomi oculomotori la velocità con cui avviene il moto, e le sue variazioni durante l'esperienza.

Ciò risulta, tuttavia, in parte coerente con l'ordinamento ipotizzato a priori, fornendo quindi un ulteriore consolidamento dell'ipotesi formulata.

Considerando, infine, i valori dell'F-SSQ-Total Score ("TS"), si osservano nuovamente differenze significative tra gli scenari, coerenti con quelle evidenziate dalle analisi di varianza sui risultati della categoria di nausea. In particolare, ANOVA riporta, per TS, un p-value = $2.9 * 10^{-5} < 0.05$; test t fornisce per le coppie, inoltre, tali valori (T. 5.12, riga 3):

1. RC e TD con p-value = $4.3 * 10^{-5} < 0.05$
2. RC e VV, p-value = 0.021 < 0.05

3. TD e VV, p-value = 0.0084 < 0.05
4. TD e TR, p-value = $1.7 * 10^{-6}$
5. VV e TR, con p-value = 0.022 < 0.05

In maniera coerente ai risultati della categoria nausea, inoltre, tra RC e TR non si registrano differenze significative: la coppia ha ottenuto, infatti, un p-value = 0.58 > 0.05. Come illustrato dai risultati delle precedenti categorie, RC e TR presentano fattori funzionali che influenzano in maniera molto simile l'intensità dei sintomi di nausea e oculomotori: risulta pertanto chiaro e triviale la motivazione per cui, considerando l'intensità totale registrata dal Total Score (derivato appunto dalle intensità di Nausea e Oculomotor), TR e RC non presentino, anche in questa categoria, alcuna differenza significativa.

L'ordinamento è ancora una volta coerente con quello identificato dalle ipotesi: si può infatti osservare, in base alle analisi di varianza e ai valori di intensità ottenuti dai test, che gli scenari RC e TR, non dissimili tra loro, risultino entrambi in grado di generare un Total Score di cybersickness maggiore rispetto, in ordine decrescente, agli scenari VV e TD, secondo quanto illustrato nei valori registrati nelle categorie di Nausea e Oculomotor, le quali influiscono direttamente sul valore del Total Score

Concludendo, è quindi possibile affermare, tramite i risultati dei test convalidati dalle analisi statistiche effettuate, che l'ipotesi formulata risulta verificata e che, pertanto, gli scenari che costituiscono il testbed risultano tutti in grado di generare sintomi di cybersickness non trascurabili negli utenti, e che, principalmente, gli scenari Rollercoaster e Track Race risultano, come ipotizzato, quelli che sono maggiormente in grado di causare i malesseri della sickness VR negli utenti.

Tabella 5.12: risultati dei Pairwise t test per gli scenari (a coppie) e del test ANOVA per categoria. Indicati i pvalue per le categorie di Nausea (F-SSQ – N), Oculomotor (F-SSQ – O) e Total Score (F-SSQ – TS) del questionario F-SSQ. I valori inferiori a $5.0 * 10^{-2}$, che indicano differenze significative, sono indicati in grassetto.

	Valori normalizzati per scenario				ANOVA	Pairwise T-Test					
F-SSQ	**RC**	**TD**	**VV**	**TR**	**p-value**	**p-value (RC-TD)**	**p-value (RC-VV)**	**p-value (RC-TR)**	**p-value (TD-VV)**	**p-value (TD-TR)**	**p-value (VV-TR)**
F-SSQ – N	0.45	0.20	0.32	0.39	**< .001**	**< .001**	**.003**	.315	**.035**	**< .001**	**.014**
F-SSQ – O	0.34	0.20	0.23	0.34	**.015**	**.010**	.083	.968	.301	**.003**	**.047**
F-SSQ – TS	0.39	0.20	0.27	0.37	**< .001**	**< .001**	**.021**	.583	**.008**	**< .001**	**.022**

6.Conclusioni e sviluppi futuri

Questo ultimo capitolo è dedicato ad analizzare eventuali punti di pregio e limitazioni riscontrate durante la realizzazione di questo lavoro di tesi e a proporre spunti per potenziali sviluppi futuri.

6.1 Conclusioni

Questo elaborato è il risultato di un lungo e complesso lavoro sviluppato in differenti fasi. Una prima versione di questo strumento, che comprendeva solamente una realizzazione parziale, in termini di funzionalità, di due dei quattro scenari proposti, il Viking village e il Track race, era già presente nel mese di marzo 2021. A partire da questa prima base, nei mesi successivi sono stati ultimati gli scenari di test già presenti e sviluppati *ex-novo* quelli mancanti (Rollercoaster e Tower defense).

A partire da settembre 2021 si è poi svolta la seconda fase della realizzazione, terminata nel novembre dello stesso anno, consistente in test preliminari volti ad esaminare il corretto funzionamento dell'applicativo e a proporre ed attuare eventuali modifiche con la finalità di migliorare meccaniche e aspetti essenziali dei quattro scenari di test in vista della successiva fase di test. L'attuale versione dell'applicazione VR realizzata è, pertanto, il culmine dello strumento originale, rimaneggiato, modificato e incrementato durante queste due fasi terminate nel Novembre 2021.

Sulla versione finale dell'applicazione di testbed sono, infine, stati realizzati le numerose sperimentazioni sugli utenti di test. Quest'ultima fase, protratta da fine novembre 2021 e terminata nel febbraio 2022, è stata quella che ha richiesto maggiore organizzazione: il numero elevato di partecipanti, unito alla situazione globale della pandemia Covid-19, ha causato un prolungamento inatteso nello svolgimento e nel raccoglimento dei risultati delle sperimentazioni.

I risultati ottenuti dai test hanno, infine, consentito di confrontare tra loro i singoli scenari evidenziando le differenze intrinseche tra ognuno di essi, e di svolgere analisi statistiche con l'obiettivo di validare e confermare con solidità la presenza di tali essenziali differenze, dimostrando che i risultati ottenuti sono allineati con quelli attesi in base alle caratteristiche funzionali, a partire dalle quali è stato realizzato il testbed.

In particolare, si è dimostrato come lo scenario Rollercoaster risulti in grado di generare una maggiore intensità dei sintomi della cybersickness rispetto ai restanti Track race, Viking village e Tower defense (ordinati per intensità decrescente dei sintomi), nonostante la sua minore durata media di esposizione. Inoltre, si è confermato, come evidenziato in alcuni studi recenti sull'attuale tecnologia VR, che i sintomi preponderanti generati sugli utenti di test risultano quelli appartenenti alla categoria Nausea, seguiti da quelli oculomotori e di disorientamento; questo

andamento è infatti rispecchiato dai risultati ottenuti in tutti e quattro gli scenari. Infine, a partire da tale osservazione, si sono potuti esaminare nel dettaglio i singoli sintomi, tra i 16 appartenenti al questionario SSQ, osservando come i sintomi predominanti nelle varie sperimentazioni consistano in Malessere generale, Sudorazione e Nausea e Difficoltà nel concentrarsi, i quali appartengono, coerentemente con quanto anticipato, alla categoria di sintomi di Nausea.

Lo strumento di testbed realizzato nel corso di questo lavoro di tesi, pertanto, rispecchia gli obiettivi e le finalità con cui è stato sviluppato: risulta infatti in grado di generare cybersickness non trascurabili e differenti in intensità, in base allo scenario di test utilizzato, costituendo quindi un valido strumento utilizzabile per sviluppatori terzi per testare e valutare le proprie tecniche di mitigazione su scenari con caratteristiche funzionali differenti. Ciò consentirebbe quindi di ottenere risultati di validità più generale, applicabili pertanto ad ambienti di utilizzo meno specifici nel panorama delle applicazioni VR.

6.2 Sviluppi futuri

L'applicazione e la sperimentazione realizzate non sono esenti da limitazioni di varia tipologia; vi sono infatti alcuni punti in cui esse possono essere migliorate nel corso di eventuali studi e sviluppi futuri.

Per quanto riguarda l'applicazione, in primo luogo, si potrebbero migliorare le modalità di locomozione all'interno degli scenari Track race e Tower defense, spesso ritenute poco intuitive dai partecipanti ai test. Nel Track race, il movimento del veicolo è realizzato associando la sterzata al trackpad del controller sinistro e l'accelerazione al trackpad destro; una soluzione più intuitiva potrebbe consistere nell'associare accelerazione e retromarcia ai grilletti destro e sinistro rispettivamente, e usare la semplice pressione dei trackpad per girare a destra o sinistra (premendo, rispettivamente, quello destro o sinistro). Nel Tower defense, la modalità di rotazione della piattaforma ha causato, negli istanti iniziali dei test, confusione in alcuni degli utenti: un potenziale miglioramento potrebbe consistere nel ruotare automaticamente la piattaforma nella direzione in cui il partecipante punta l'arma virtuale, in modo tale che egli risulti sempre direzionato frontalmente nella direzione desiderata.

Inoltre, nello scenario Tower defense, si potrebbe migliorare la modalità di tracciamento della direzione di avvicinamento dei nemici, sostituendo le lampade poste ai lati della torre con un radar virtuale posto nella mano inutilizzata dell'utente, in modo che risulti sempre visibile e di più facile comprensione.

In aggiunta, la durata temporale per i singoli scenari potrebbe subire i seguenti miglioramenti: agli scenari Rollercoaster e Tower defense si potrebbe associare una maggiore durata dell'esperienza, portandola dai circa 10 minuti medi a 15 minuti di durata, in modo tale da raccogliere maggiori informazioni anche dagli utenti più resistenti; la durata del Viking village, invece, può essere potenzialmente ridotta, riducendo il numero di giri da 10 a 7-8, in quanto, in base ai dati rilevati dai test, gli utenti più suscettibili raramente superano tale numero di giri, mentre per quelli più resistenti non risultano differenze di intensità tra settima-ottava e decima ripetizione.

Infine, in base a quanto può essere osservato a partire dai risultati delle analisi statistiche riguardanti le differenze significative tra gli scenari realizzati, risulta che gli scenari Rollercoaster e Track race non siano significativamente dissimili tra di loro. Una valida soluzione potrebbe consistere nel variare alcune caratteristiche essenziali che li costituiscono: si potrebbe, ad esempio, modificare il circuito del Track race rendendolo una pista sterrata; ciò consentirebbe di introdurre "vibrazioni" molto frequenti della visuale, che si distanzierebbero dal moto fluido e costituito solamente da rotazioni presente nel Rollercoaster, incrementando pertanto le differenze nelle modalità e nelle caratteristiche del moto presente nei due scenari.

Per quanto riguarda invece le modalità di sperimentazione, l'esecuzione dei test e l'ottenimento di risultati può essere migliorata in vari modi:

1. Incrementare il numero di utenti di test, ottenendo un numero abbastanza elevato da poter generalizzare ancora meglio i risultati ottenuti.
2. Utilizzare strumenti di tracciamento in tempo reale dei parametri oggettivi degli utenti, quali ad esempio il battito cardiaco, in modo da visionare con più precisione l'andamento temporale dei sintomi della cybersickness sui partecipanti. I risultati raccolti nei test svolti in questo elaborato considerano, infatti, solo dati provenienti da questionari e misurazioni pre e post esperienza; l'unica misurazione ricavata durante l'esecuzione è quella fornita dal questionario Discomfort Scale, che ha tuttavia il difetto di ridurre il senso di presenza e immersione dell'utente nel VE, influendo sulla sua esperienza nello scenario. Uno strumento real-time di misurazione oggettiva dei parametri corporei risulterebbe sicuramente meno invasivo e consentirebbe di ottenere una maggiore immersione dell'utente senza quindi influenze provenienti dall'ambiente esterno alla simulazione.
3. Sottoporre ulteriori questionari soggettivi ai partecipanti in modo da raccogliere maggiori informazioni riguardanti aspetti differenti, quali senso di presenza, immersione e persino stato d'ansia, non tenuti in considerazione dall'SSQ e dall'MSSQ.

A.Appendice - Questionari

In questa appendice sono mostrati i questionari utilizzati durante lo svolgimento di questo lavoro di tesi.

A.1 General Questionnaire

Questo primo questionario include le informazioni anagrafiche dei partecipanti e cinque brevi domande a risposta numerica riguardanti l'esperienza dell'utente in alcuni ambiti di interesse. Il valor medio di queste risposte fornisce l'indice di esperienza per l'utente esaminato.

Nome: _____ Cognome: _____ Sesso (M/F/*): ____
Data di nascita: _____

Numero identificativo: ___

\	1	2	3	4	5
Familiarità con la realtà virtuale					
Quanto spesso giochi a videogiochi?					
Quanto spesso utilizzi applicazioni VR (giochi VR compresi)					
Esperienze di guida					
Esperienze su giostre					

Compila il questionario come segue:

1 = Per nulla/ assolutamente no, 5 = tanto

A.2 Questionario MSSQ

Questo secondo questionario svolge il ruolo di identificare e valutare numericamente la suscettibilità degli utenti alla VR tramite domande relative ad esperienze pregresse relative a sintomi di sickness provati (in infanzia e in età adulta rispettivamente) su alcuni mezzi di trasporto o attrazioni. Fornisce un risultato noto come *MSSQ RawScore* appartenente all'intervallo [0,54] che identifica la suscettibilità dell'utente (0: nulla, 54: elevata).

MSSQ	**Mai viaggiato – Nessuna esperienza**	**Non mi sono mai sentito male**	**Mi sono sentito male raramente**	**Ogni tanto mi sono sentito male**	**Mi sento male frequentemente**
Inserisci solo dati relativi alla **TUA ESPERIENZA DURANTE L'INFANZIA** (**prima dei 12 anni**). Per ognuno dei mezzi di trasporto presenti, indica:					
1. Da **bambino** (<12 anni), quanto spesso ti sei **sentito Male o Nauseato**:					
In Macchina					
In autobus					
In treno					
In aereo					
Su barche di piccole dimensioni					
Su navi e traghetti					
Sull'altalena del parco giochi					
Sul carosello (giostra e/o parco giochi)					
Sulle montagne russe o su giostre simili					
	t	0	1	2	3
Inserisci solo dati relativi alla **TUA ESPERIENZA DURANTE negli ultimi 10 anni (circa)**. Per ognuno dei mezzi di trasporto presenti, indica:					
2. 2. Negli **ultimi 10 anni**, quanto spesso ti sei **sentito Male o Nauseato**:					
In Macchina					
In autobus					
In treno					
In aereo					
Su barche di piccole dimensioni					
Su navi e traghetti					
Sull'altalena del parco giochi					
Sul carosello (giostra e/o parco giochi)					
Sulle montagne russe o su giostre simili					
	t	0	1	2	3

A.3 Questionario SSQ

Questo terzo questionario è quello che fornisce informazioni riguardanti l'intensità dei sintomi percepita dagli utenti una volta terminata l'esperienza virtuale. Consiste in 16 sintomi, per ognuno dei quali il partecipante deve fornire una misura di entità scegliendo, per ciascun sintomo, tra "Nessuno", "Leggero", "Moderato" o "Elevato". Da tali valori, associati a numeri interi nell'intervallo [0,3], si ottengono i punteggi di intensità delle categorie di sintomi di Nausea, Oculomotor e Disorientation, e il punteggio totale Total Score che fornisce una visione più generica sull'intensità dei sintomi subiti dagli utenti.

1	**Malessere/Fastidio generale**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
2	**Affaticamento**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
3	**Mal di testa**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
4	**Affaticamento visivo**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
5	**Difficoltà nel mettere a fuoco**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
6	**Aumento della salivazione**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
7	**Sudorazione**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
8	**Nausea**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
9	**Difficoltà nel concentrarsi**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
10	**"Testa pesante"**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
11	**Visione sfocata**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
12	**Capogiri con gli occhi aperti**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
13	**Capogiri con gli occhi chiusi**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
14	**Vertigini**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
15	**Dolori allo stomaco**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato
16	**Digestione/Burping**	Nessuno	Leggero	Moderato	Elevato

Bibliografia

[1] Caserman, P., Garcia-Agundez, A., Gámez Zerban, A., Göbel, S., 2021. Cybersickness in current-generation virtual reality head-mounted displays: systematic review and outlook. Virtual Reality. doi:10.1007/s10055-021-00513-6

[2] Joseph J. LaViola. 2000. A discussion of cybersickness in virtual environments. SIGCHI Bull. 32, 1 (Jan. 2000), 47–56. DOI: https://doi.org/10.1145/333329.333344

[3] Simon Davis, Keith Nesbitt, and Eugene Nalivaiko. 2014. A Systematic Review of Cybersickness. In Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment (IE2014). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–9. DOI: https://doi.org/10.1145/2677758.2677780

[4] Kolasinski, E. M. 1995. Simulator sickness in virtual environments. Technical Report. United States Army Research Institute for Behavioral and Social Sciences.

[5] L. Frank, R. S. Kennedy, M. E. McCauley, R. W. Root, R. S. Kellogg, and A. C. Bittner. Simulator Sickness: Sensorimotor Disturbances Induced in Flight Simulators, The Image H Conference, 417-426, 1983.

[6] Michael E. McCauley and Thomas J. Sharkey. CyberSickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments. Presence, 1(3):311-318, 1992

[7] Randy Pausch, Thomas Crea, and Matthew Conway. A Literature Survey for Virtual Environments: Military Flight Simulators Visual Systems and Simulator Sickness. Presence 1(3):344-363, 1992.

[8] K. Harwood and P. Foley. Temporal Resolution: An Insight into the Video Display Terminal (VDT) "Problem". Human Factors, 29(4):447-452, 1987.

[9] Fauville, G., Queiroz, A.C.M., Woolsey, E.S., Kelly, J.W., Bailenson, J.N., 2021. The effect of water immersion on vection in virtual reality. Scientific Reports 11. doi:10.1038/s41598-020-80100-y

[10] J. T. Reason and J. J. Brand, Motion Sickness, London: Academic press, 1975.

[11] Thomas A. Stoffregen and Gary E. Riccio. An Ecological Critique of the Sensory Conflict Theory of Motion Sickness. Ecological Psychology, 3(3): 159-195, 1991.

[12] Keith Nesbitt, Simon Davis, Karen Blackmore, Eugene Nalivaiko, correlating reaction time and nausea measures with traditional measures of cybersickness, Displays, Volume 48,2017, Pages 1-8, ISSN 0141-9382, https://doi.org/10.1016/j.displa.2017.01.002.

[13] Eunhee Chang, Hyun Taek Kim & Byounghyun Yoo (2020) Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements, International Journal of Human–Computer Interaction, 36:17, 1658-1682, DOI: 10.1080/10447318.2020.1778351

[14] Stanney, K. M., Kennedy, R. S., & Hale, K. S. (2014). Virtual environment usage protocols. In K. S. Hale & K. M. Stanney (Eds.), Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications (2nd ed., pp. 797–809). CRC Press.

[15] Stanney KM, Kennedy RS, Drexler JM. Cybersickness is Not Simulator Sickness. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 1997;41(2):1138-1142. doi:10.1177/107118139704100292

[16] John F Golding, Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness, Brain Research Bulletin, Volume 47, Issue 5, 1998, Pages 507-516, ISSN 0361-9230, https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00091-4.

[17] Volkan Sevinc, Mehmet Ilker Berkman, Psychometric evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments, Applied Ergonomics, Volume 82, 2020, 102958, ISSN 0003-6870, https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102958.

[18] D. Jeong, S. Yoo and J. Yun, "Cybersickness Analysis with EEG Using Deep Learning Algorithms," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2019, pp. 827-835, doi: 10.1109/VR.2019.8798334.

[19] S. Jung, R. Li, R. McKee, M. C. Whitton and R. W. Lindeman, "Floor-vibration VR: Mitigating Cybersickness Using Whole-body Tactile Stimuli in Highly Realistic Vehicle Driving Experiences," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 27, no. 5, pp. 2669-2680, May 2021, doi: 10.1109/TVCG.2021.3067773.

[20] Malińska, M., Zużewicz, K., Bugajska, J., Grabowski, A., 2015. Heart rate variability (HRV) during virtual reality immersion. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 21, 47–54.. doi:10.1080/10803548.2015.1017964

[21] G. Kramida, "Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 22, no. 7, pp. 1912-1931, 1 July 2016, doi: 10.1109/TVCG.2015.2473855.

[22] Bowman, D.A., Mcmahan, R.P., 2007. Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough?. Computer 40, 36–43.. doi:10.1109/mc.2007.257

[23] Martijn L. van Emmerik, Sjoerd C. de Vries, Jelte E. Bos, "Internal and external fields of view affect cyber-sickness". Displays, Volume 32, Issue 4, 2011, Pages 169-174, ISSN 0141-9382, https://doi.org/10.1016/j.displa.2010.11.003. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141938210000934)

[24] A. S. Fernandes and S. K. Feiner, "Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification," 2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), Greenville, SC, USA, 2016, pp. 201-210, doi: 10.1109/3DUI.2016.7460053.

[25] Nahal Norouzi, Gerd Bruder, and Greg Welch. 2018. Assessing vignetting as a means to reduce VR sickness during amplified head rotations. In Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception (SAP '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 19, 1–8. DOI: https://doi.org/10.1145/3225153.3225162

[26] H. Buhler, S. Misztal and J. Schild, "Reducing VR Sickness Through Peripheral Visual Effects," 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Tuebingen/Reutlingen, Germany, 2018, pp. 517-9, doi: 10.1109/VR.2018.8446346.

[27] B. E. Riecke, J. Schulte-Pelkum, M. N. Avraamides, M. V. D. Heyde, and H. H. Bulthoff. Cognitive factors can influence self-motion perception (vection) in virtual reality. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), 3(3):194–216, 2006.

[28] P. Budhiraja, M.R. Miller, A. K. Modi, D. Forsyth. "Rotation Blurring: Use of Artificial Blurring to Reduce Cyber-sickness in Virtual Reality First Person Shooters". arXiv:1710.02599 (arxiv.org), 2017.

[29] G. Nie, H. B. Duh, Y. Liu and Y. Wang, "Analysis on Mitigation of Visually Induced Motion Sickness by Applying Dynamical Blurring on a User's Retina," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 26, no. 8, pp. 2535-2545, 1 Aug. 2020, doi: 10.1109/TVCG.2019.2893668.

[30] S. Ang and J. Quarles, "GingerVR: An Open-Source Repository of Cyber-sickness Reduction Techniques for Unity," 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), Atlanta, GA, USA, 2020, pp. 460-463, doi: 10.1109/VRW50115.2020.00097.

[31] Z. Cao, J. Jerald and R. Kopper, "Visually-Induced Motion Sickness Reduction via Static and Dynamic Rest Frames," 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Tuebingen/Reutlingen, Germany, 2018, pp. 105-112, doi: 10.1109/VR.2018.8446210.

[32] C. Wienrich, C. K. Weidner, C. Schatto, D. Obremski and J. H. Israel, "A Virtual Nose as a Rest-Frame - The Impact on Simulator Sickness and Game Experience," 2018 10th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games), Würzburg, Germany, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/VS-Games.2018.8493408.

[33] Andras Kemeny, Paul George, Frédéric Merienne, Florent Colombet. New VR Navigation Techniques to Reduce Cyber-sickness. The Engineering Reality of Virtual Reality, Jan 2017, San Francisco, United States. pp.48-53, ⟨10.2352/ISSN.2470-1173.2017.3.ERVR-097⟩. ⟨hal-01779593⟩

[34] Y. Farmani and R. J. Teather. Viewpoint snapping to reduce cyber-sickness in virtual reality. In Proceedings of the 44th Graphics Interface Conference, pp. 168–175. Canadian Human-Computer Communications Society, 2018.

[35] R. Lou and J. -R. Chardonnet, "Reducing Cyber-sickness by Geometry Deformation," 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), Osaka, Japan, 2019, pp. 1058-1059, doi: 10.1109/VR.2019.8798164.

[37] K. Carnegie and T. Rhee, "Reducing Visual Discomfort with HMDs Using Dynamic Depth of Field," in IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 35, no. 5, pp. 34-41, Sept.-Oct. 2015, doi: 10.1109/MCG.2015.98.

[38] S. Jung, R. Li, R. McKee, M. Whitton and R. Lindeman, "Floor-vibration VR: Mitigating Cybersickness Using Whole-body Tactile Stimuli in Highly Realistic Vehicle Driving Experiences" in IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, vol. 27, no. 05, pp. 2669-2680, 2021. doi: 10.1109/TVCG.2021.3067773 url: https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TVCG.2021.3067773

[39] Weech, S., Wall, T. & Barnett-Cowan, M. Reduction of cybersickness during and immediately following noisy galvanic vestibular stimulation. Exp Brain Res 238, 427–437 (2020). https://doi.org/10.1007/s00221-019-05718-5

[40] http://www.sigtrapgames.com/VrTunnellingPro/html/

[41] Chen, C.-Y., Chuang, C.-H., Tsai, T.-L., Chen, H.-W., Wu, P.-J., 2021. Reducing cybersickness by implementing texture blur in the virtual reality content. Virtual Reality.. doi:10.1007/s10055-021-00587-2

[42] Golding JF. Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness. Brain Res Bull. 1998 Nov 15;47(5):507-16. doi: 10.1016/s0361-9230(98)00091-4. PMID: 10052582.

[43] John F. Golding, Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire, Personality and Individual Differences, Volume 41, Issue 2, 2006, Pages 237-248, ISSN 0191-8869, https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.01.012

[44] Webb, Catherine. (2010). Simulator Sickness in the MH-47G Simulator, 14.

[45] P. Bimberg, T. Weissker and A. Kulik, "On the Usage of the Simulator Sickness Questionnaire for Virtual Reality Research," 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), 2020, pp. 464-467, doi: 10.1109/VRW50115.2020.00098.

[46] Yun-Xuan Lin, Rohith Venkatakrishnan, Roshan Venkatakrishnan, Elham Ebrahimi, Wen-Chieh Lin, and Sabarish V. Babu. 2020. How the Presence and Size of Static Peripheral Blur Affects Cybersickness in Virtual Reality. ACM Trans. Appl. Percept. 17, 4, Article 16 (October 2020), 18 pages. DOI:https://doi.org/10.1145/3419984

[47] Bouchard, S., Robillard, G., Renaud, P., 2007. Revising the factor structure of the simulator sickness questionnaire. Summer. Annu. Rev. Cybertherapy Telemed. 5, 128–137.

[48] Stone III, W.B., 2017. Psychometric Evaluation of the Simulator Sickness Questionnaire as a Measure of Cybersickness. Doctoral dissertation. Iowa State University.

[49] Kim, H.K., Park, J., Choi, Y., Choe, M., 2018. Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): motion sickness measurement index in a virtual reality environment. Appl. Ergon. 69, 66–73. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016.

[50] North Atlantic Treaty Organization, Science and Technology Organization, 2019. Guidelines for Mitigating Cybersickness in Virtual Reality Systems, chapter 5.

[51] Rebenitsch, L., Owen, C., 2021. Estimating cybersickness from virtual reality applications. Virtual Reality 25, 165–174.. doi:10.1007/s10055-020-00446-6

[52] Zielasko, D., Riecke, B.E., 2021. To Sit or Not to Sit in VR: Analyzing Influences and (Dis)Advantages of Posture and Embodied Interaction. Computers 10, 73.. doi:10.3390/computers10060073

[53] Bouchard Stéphane, Berthiaume Maxine, Robillard Geneviève, Forget Hélène, Daudelin-Peltier Camille, Renaud Patrice, Blais Caroline, Fiset Daniel, Arguing in Favor of Revising the Simulator Sickness Questionnaire Factor Structure When Assessing Side Effects Induced by Immersions in Virtual Reality, Frontiers in Psychiatry, volume 12, 2021, doi=10.3389/fpsyt.2021.739742, ISNN= 1664-0640

[54] K. S. Hale, K. M. Stanney, Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications, Second Edition, editore Taylor & Francis Inc, 2014, EAN: 9781466511842

[55] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum & Michael G. Lilienthal (1993) Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, The International Journal of Aviation Psychology, 3:3, 203-220, DOI: 10.1207/s15327108ijap0303_3

[56] Michel Treisman, Motion Sickness: An Evolutionary Hypothesis,1977, Science, volume 197, number 4302, pages 493-495, doi = 10.1126/science.301659

[57] Oman, Charles M. 'Are Evolutionary Hypotheses for Motion Sickness "just-so" Stories?' 1 Jan. 2012 : 117 – 127.

[58] Caserman, P., Garcia-Agundez, A., Gámez Zerban, A. *et al.* Cybersickness in current-generation virtual reality head-mounted displays: systematic review and outlook. *Virtual Reality* **25,** 1153–1170 (2021). https://doi.org/10.1007/s10055-021-00513-6

[59] Islam, Rifatul & Desai, Kevin & Quarles, John. (2021). Cybersickness Prediction from Integrated HMD's Sensors: A Multimodal Deep Fusion Approach using Eye-tracking and Head-tracking Data. 10.1109/ISMAR52148.2021.00017.

[60] Pulkit Budhiraja, Mark Roman Miller, Abhishek K Modi, David Forsyth, Rotation Blurring: Use of Artificial Blurring to Reduce Cybersickness in Virtual Reality First Person Shooters, arXiv:1710.02599, https://doi.org/10.48550/arXiv.1710.02599

[61] https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/roadways/race-tracks-140501

[62] https://assetstore.unity.com/packages/essentials/tutorial-projects/viking-village-urp-29140

[63] https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/ms-vehicle-system-free-version-90214

[64] https://assetstore.unity.com/packages/tools/utilities/b-zier-path-creator-136082