



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

**Simulazione di veicoli autonomi
in realtà virtuale immersiva e
studio del comportamento degli
utenti della strada**

Relatore

prof. Fabrizio Lamberti

Candidato

Edoardo Pietro Demuru
matricola: 252926

Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2020

Ai miei genitori

Sommario

Nel corso degli ultimi anni il settore dei veicoli autonomi ha attirato l'interesse dell'opinione pubblica e di diverse case produttrici. Tuttavia, nonostante l'evoluzione tecnologica permetterà nel corso del prossimo decennio di dar vita ai primi prototipi di veicoli completamente autonomi, permangono ancora alcune problematiche legate all'interazione tra veicoli autonomi e utenti della strada. In questo contesto, la tesi si propone di effettuare uno studio delle possibili interfacce esterne per veicoli autonomi. L'obiettivo principale è comprendere come un pedone possa interagire con un veicolo autonomo senza la presenza di un guidatore umano. Per raggiungere questo scopo è stato condotto dapprima uno studio dello stato dell'arte sulle interfacce esterne proposte per veicoli autonomi. Successivamente, è stato realizzato un ambiente virtuale tridimensionale, all'interno del quale è stato programmato il comportamento realistico di alcuni veicoli autonomi. Le interfacce più promettenti tra quelle individuate nello stato dell'arte e loro varianti sono quindi state implementate nell'ambiente virtuale. Infine, basandosi su informazioni ricavate da altri lavori, sono state definite le modalità con cui valutare l'esperienza utente da un punto di vista qualitativo e quantitativo, predisponendo il materiale necessario per avviare, successivamente alla tesi, una fase di sperimentazione.

Indice

Elenco delle tabelle	8
Elenco delle figure	9
1 Introduzione	11
2 Stato dell'arte	15
2.1 Veicoli autonomi	15
2.1.1 Classificazione	16
2.1.2 Livelli e tecnologie	17
2.1.3 Vantaggi e problematiche	18
2.1.4 Previsioni future	20
2.2 Interazione veicolo autonomo-pedone	20
2.2.1 Interazione tra guidatore e pedone	21
2.2.2 Interazione basata sul movimento del veicolo	22
2.2.3 Display esterni	24
2.2.4 Proiezioni	31
2.2.5 Smart road	32
2.2.6 Combinazioni di indizi	33
2.2.7 Interfacce in realtà aumentata	35
3 Tecnologie	37
3.1 Unity e asset	37
3.1.1 Unity	37
3.1.2 AirSim e Windridge City	38
3.2 Tecnologie di Unity3d	39
3.2.1 Data-Oriented Technology Stack	39
3.2.2 High Definition Render Pipeline	41
3.2.3 Shader graph	43

3.3	Samsung Odyssey	44
3.4	MSI VR One Backpack PC	45
4	Realizzazione	47
4.1	Configurazione dello scenario	47
4.1.1	Importazione AirSim	47
4.2	Ottimizzazione	48
4.2.1	Conversione a ECS	48
4.2.2	Configurazione HDRP	49
4.2.3	Ottimizzazioni grafiche	50
4.3	Configurazione veicoli	51
4.3.1	Configurazione curve di decelerazione	51
4.3.2	Controllore PID	53
4.4	Selezione delle interfacce	53
4.4.1	Smile e Projection	55
4.4.2	Smart road	56
4.4.3	Realtà aumentata	56
4.5	Realizzazione delle interfacce	57
4.5.1	Smile	57
4.5.2	Projection	58
4.5.3	Smart road	59
4.5.4	Realtà aumentata	61
5	Valutazione dell'esperienza utente	65
5.1	Preparazione alla simulazione	65
5.2	Attraversamento	66
5.3	Treno di veicoli	66
5.4	Misure	68
5.4.1	Misure quantitative	68
5.4.2	Misure qualitative	69
6	Conclusioni e sviluppi futuri	71
6.1	Conclusioni	71
6.2	Sviluppi futuri	72
A	Questionario di valutazione dell'esperienza utente	75
A.1	Questionario pre-simulazione	75
A.1.1	Domande personali	75
A.1.2	Opinione degli utenti nei confronti dei veicoli autonomi	75
A.1.3	Autovalutazione dello stato di salute pre-simulazione .	76

A.2	Domande post-tutorial	77
A.3	Domande post-interfaccia	77
A.3.1	System Usability Scale	77
A.3.2	Trust Scale	77
A.3.3	NasaTLX	78
A.3.4	User Experience Questionnaire	79
A.3.5	Sicurezza percepita	79
A.3.6	Valutazione distanza tra veicoli	79
A.3.7	Classificazione interfaccia rispetto alla baseline	80
A.4	Questionario post-esperienza	80
A.4.1	Autovalutazione dello stato di salute post-simulazione	80
A.4.2	VRUSE	81
A.4.3	Valutazione veicolo autonomo	82
A.4.4	Classificazione interfacce	82

Elenco delle tabelle

4.1	Interfacce	54
-----	------------	----

Elenco delle figure

2.1	Intervalli di tempo ottimali per veicoli di grosse e piccole dimensioni a differenti livelli di velocità [1].	23
2.2	Intervalli di tempo ottimali per gruppi di diversa età a differenti livelli di velocità [1].	24
2.3	Eyes on a car - Concept di interazione [2].	25
2.4	Eyes on a car - Prototipo [3].	25
2.5	Accensione LED: Nessun warning (in alto a sinistra), warning bianco (in alto a destra), warning verde (in basso a sinistra), warning rosso (in basso a destra) [4].	26
2.6	Schema di funzionamento dell'interfaccia [5].	27
2.7	Prototipo AVIP [6, 7].	27
2.8	Interfaccia basata su LED in realtà virtuale [8].	28
2.9	Interfaccia Smiling car [8].	29
2.10	Prototipo di interfaccia esplicita [9].	30
2.11	Prototipo di interfaccia proiettata sul terreno [10].	31
2.12	Proiezione di strisce pedonali sul terreno [8].	32
2.13	Prototipo di Smart road: in questo caso è sicuro attraversare [11].	33
2.14	Prototipo di Smart road: in questo caso è vietato attraversare [11].	33
2.15	Diverse combinazioni di indizi: A - Indizio Visivo e uditivo montato sul veicolo, B - Indizio uditivo montato sul veicolo e indizio visivo nell'infrastruttura stradale, C - Indizio visivo montato sul veicolo e Indizio tattile in un dispositivo personale dell'utente, D - Combinazione dei casi elencati in precedenza.	34
2.16	Primo design - Percorso pedone e direzione veicoli [12].	35
2.17	Secondo design - Safe zone [12].	36
2.18	Terzo design - Safe zone e direzione veicoli [12].	36
3.1	Interfaccia di Unity3d.	38
3.2	Scenario Windridge City [13].	39

3.3	Object Oriented Design in Unity.	40
3.4	Entity Component Sytem in Unity.	41
3.5	Scenario renderizzato con HDRP.	42
3.6	Esempio di shader realizzato con shader graph.	44
3.7	Samsung HMD Odyssey [14]	45
3.8	MSI VR One BackPack PC [15]	45
4.1	Shader realizzato con shader graph.	49
4.2	Curve velocità-distanza.	52
4.3	Schema a blocchi del controllore PID.	53
4.4	Smile	54
4.5	Projection	54
4.6	Smart road	54
4.7	Safe roads	54
4.8	Interfaccia Smile.	58
4.9	Interfaccia Projection.	59
4.10	Smart road: stato base	60
4.11	Smart road: è sicuro attraversare	60
4.12	Smart road: è pericoloso attraversare	61
4.13	Funzionamento interfaccia in realtà aumentata	62
4.14	Prima modalità di funzionamento	63
4.15	Seconda modalità di funzionamento	63
4.16	Visualizzazione dei colori	64
5.1	Visualizzazione del treno di veicoli	67

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni si sono diffusi sempre più velocemente termini quali intelligenza artificiale, blockchain, realtà virtuale, IoT. Tutti termini che fanno riferimento alla cosiddetta quarta rivoluzione industriale, un cambiamento epocale che influenzerà direttamente la vita di miliardi di persone in tutto il mondo. Un ruolo importante in questo senso è rivestito dall'automazione, un termine che identifica quell'insieme di tecnologie che riducono l'intervento di un essere umano nella gestione di una macchina. Un settore su cui si è investito molto in ambito di automazione è il settore automobilistico. Nel 2010 i veicoli autonomi erano ancora un'utopia per le varie case automobilistiche, mentre nel 2019 questo settore si è trasformato in un'industria da miliardi di dollari, con continui investimenti da parte delle diverse case produttrici e con la speranza che entro i prossimi dieci anni potranno essere lanciati sul mercato, a disposizione delle persone comuni, i primi modelli di veicoli completamente autonomi. Il problema principale di questa nuova tecnologia è legato non tanto alle attuali limitazioni tecnologiche, ancora presenti in questa prima fase di sperimentazione, quanto al fatto che è difficile riuscire a far accettare alle persone prive di qualunque competenza tecnica, tecnologie di questo tipo.

Il problema può essere analizzato sotto due punti di vista diversi: da un lato è necessario ragionare dal punto di vista del guidatore e delle interfacce utente installate all'interno del veicolo, mentre dall'altro è necessario ragionare dal punto di vista del pedone. Infatti, per cercare di migliorare il livello di fiducia tra occupante del veicolo autonomo e veicolo stesso, nel corso degli ultimi anni sono state sviluppate una serie di interfacce interne al veicolo, in grado di fornire feedback di diverso tipo sullo stato interno del veicolo autonomo. Ma il problema si complica nel momento in cui si fa riferimento all'interazione

tra un veicolo autonomo ed altri utenti della strada. Questo perchè guidare un veicolo è prima di tutto un fenomeno sociale, che richiede un'interazione costante tra tutti gli utenti della strada, per fare in modo che il traffico non venga bloccato e non si creino situazioni di ambiguità o incertezza. Tuttavia, nel momento in cui si inseriscono nel traffico dei veicoli autonomi, privi di un guidatore umano, si viene a creare un vuoto nell'interazione, vuoto che potenzialmente potrebbe essere pericoloso per tutti gli utenti della strada e rendere ancora più complessa l'accettazione di queste nuove tecnologie [16]. A tal proposito, le interfacce interne citate in precedenza, sono state affiancate ad interfacce posizionate esternamente al veicolo autonomo. In questo caso, il veicolo autonomo, usando come intermediario questa interfaccia, è in grado di presentare il proprio stato interno o le proprie intenzioni al pedone, riducendo in questo modo l'ambiguità nell'interazione tra le due entità.

Questo lavoro di tesi ha avuto come primo obiettivo l'analisi dello stato dell'arte e degli studi effettuati in tale ambito da lavori affini, oggetto del Capitolo 1 del presente documento. Una volta completata questa operazione, il secondo obiettivo è stato quello di selezionare dallo stato dell'arte le interfacce che sono risultate le migliori in termini di esperienza utente. In particolare sono state identificate diverse tipologie di interfacce, ciascuna delle quali con diversi vantaggi ma allo stesso tempo criticità.

La prima tipologia che può essere citata è quella delle interfacce costruite in modo tale da richiamare elementi umani. A tal proposito, un esempio di questa categoria è quella che presenta una fila di luci LED, posizionata su un pannello nella parte frontale del veicolo. Queste luci si tramutano in un sorriso nel momento in cui il veicolo prende in carico il pedone. Un altro esempio di interfaccia appartenente a questa tipologia è quella caratterizzata da un paio di occhi finti, posizionati sulle luci anteriori del veicolo, che fissano il pedone nel momento in cui il veicolo lo prende in carico, ideati per cercare di sostituire il contatto visivo con un guidatore umano.

Un'altra tipologia di interfaccia individuata nello stato dell'arte è quella caratterizzata da una proiezione sul terreno realizzata dal veicolo. Questa proiezione mostra elementi familiari al pedone, quali ad esempio delle strisce pedonali di colore rosso, con lo scopo di indicare il fatto che l'utente sia stato preso in carico dal veicolo autonomo, ma non debba ancora attraversare.

A queste interfacce posizionate sul veicolo, se ne associano altre che sfruttano tecnologie diverse per trasmettere messaggi al pedone. Innanzitutto è fondamentale citare la "Smart road". Si tratta di un'interfaccia che può essere implementata utilizzando pannelli LED posizionati sull'infrastruttura stradale. Questi forniscono indicazioni sul comportamento di un generico veicolo,

autonomo o meno, sotto forma di strisce pedonali, indicazioni di pericolo e così via. Con lo sviluppo di tecnologie che garantiscono la comunicazione tra veicolo autonomo ed infrastruttura stradale, non è improbabile immaginare un futuro nel quale interfacce di questo tipo saranno presenti in diverse zone della città.

Infine l'ultima tipologia di interfaccia fa riferimento a tecnologie in realtà aumentata. Infatti, la diffusione di dispositivi personali in realtà aumentata, permette di immaginare un futuro nel quale la maggior parte delle persone possederanno strumenti di questo tipo e saranno in grado di interagire direttamente col veicolo autonomo, con un canale di comunicazione diretto e personale. Anche in questo caso sono stati proposti nello stato dell'arte alcuni concept che richiamano tecnologie di questo tipo. In particolare sono stati realizzati una serie di prototipi che permettono di indicare, con l'ausilio di una freccia, posta nella parte frontale del veicolo, lo spazio di frenata massimo del veicolo così come, con l'ausilio di colori posizionati poco sopra il manto stradale, le sezioni di strada sulle quali è sicuro per il pedone effettuare l'attraversamento.

Una volta selezionate dallo stato dell'arte queste tipologie di interfacce e sviluppate delle loro varianti per superarne possibili limiti, l'ultimo obiettivo di questo lavoro di tesi è stato quello di creare un ambiente di simulazione in realtà virtuale che permettesse ad un utente, immerso nell'ambiente di simulazione, di sperimentare le suddette interfacce e confrontarle tra di loro. La simulazione è stata strutturata in modo da garantire un comportamento realistico dei veicoli autonomi in uno scenario con un sistema di gestione del traffico. Il Capitolo 2 di questo documento è dedicato alle tecnologie che sono state utilizzate per la realizzazione della suddetta simulazione. Il Capitolo 3 descrive il processo seguito per realizzare la simulazione, predisponendo il materiale necessario per avviare, successivamente alla tesi, una fase di sperimentazione. Il Capitolo 4 è incentrato sulla descrizione della metodologia con cui realizzare i test ed effettuare l'analisi dell'esperienza utente. Infine il Capitolo 6 è dedicato alle conclusioni e agli eventuali sviluppi futuri.

Capitolo 2

Stato dell'arte

Questo capitolo è focalizzato sullo stato dell'arte dei veicoli autonomi: in particolare sono riportate una prima sezione sulla definizione di veicolo autonomo e sulle tecnologie che lo caratterizzano, ed una seconda sezione che è invece incentrata sui metodi di comunicazione tra veicolo autonomo e pedone, aspetto fondamentale per questo lavoro di tesi.

2.1 Veicoli autonomi

Con il termine veicoli autonomi si fa riferimento a quei sistemi in grado di prendere decisioni senza alcun intervento da parte di un essere umano [17]. Tuttavia, diversamente dal concetto di automazione, i veicoli autonomi sono in grado di prendere delle decisioni su quali operazioni eseguire anche in contesti di incertezza o ambiguità. Indipendentemente da quali siano le cause di questa incertezza, la condizione necessaria affinché un veicolo possa essere definito autonomo è quella di possedere l'abilità di identificare certi contesti in un ambiente mutevole ed eseguire le opportune funzioni in modo tale che il comportamento del veicolo stesso risulti conforme a certe norme o vincoli [18]. Il concetto di veicolo autonomo nasce nel 1939. In quell'anno infatti, a New York, General Motors (GM) sponsorizzò l'esposizione soprannominata Futurama, mettendo in mostra il modello di una città futuristica, nel quale le macchine erano in grado di guidarsi da sole lungo una serie di percorsi predefiniti. Tuttavia si è dovuto aspettare il XXI secolo affinché la tecnologia raggiungesse un livello di evoluzione tale da garantire la nascita dei primi veri veicoli autonomi. Compagnie come GM o Volkswagen hanno cominciato a stringere vari accordi con gruppi di ricerca universitari per sviluppare sistemi di guida autonoma sempre più complessi. Google ha dato il via all'iniziativa

“Driverless Car”, oggi chiamata Waymo, assumendo alcuni tra i migliori ingegneri nel campo. Uber ha aperto ad inizio 2015 il proprio “self-driving car lab”, con l’idea di dare vita ai primi taxi a guida autonoma. E così altre società hanno investito in questo campo, tra cui Tesla, BMW, Mercedes-Benz, Apple [19].

2.1.1 Classificazione

Uno tra gli standard attualmente più diffusi per la classificazione dei veicoli autonomi è quello pubblicato dal SAE (Society of Automotive Engineers), un organismo internazionale di standardizzazione nel settore aerospaziale e autoveicolistico [20]. La versione più recente dello standard fornisce una classificazione dei veicoli autonomi basata su sei livelli come riportato di seguito:

0. Nessuna automazione nella guida: il guidatore ha il pieno controllo del veicolo.
1. Assistenza alla guida: il sistema di guida autonomo ha il controllo parziale o del movimento laterale o di quello longitudinale del veicolo, non di entrambi. Il resto delle azioni deve essere eseguito dal guidatore.
2. Automazione parziale: il sistema di guida autonoma ha il controllo parziale del movimento laterale e longitudinale del veicolo. Il guidatore deve tuttavia occuparsi di supervisionare l’intero sistema di guida autonoma, e di individuare eventuali ostacoli lungo la strada e reagire di conseguenza prendendo il controllo del mezzo.
3. Automazione condizionata: A questo livello entra in gioco il sistema di guida autonoma in grado di avere il controllo totale sulla guida del veicolo, limitato da un ODD (Operational Design Domain), ovvero un dominio applicativo all’interno del quale il veicolo è in grado di operare correttamente. Tuttavia il guidatore deve poter essere in grado di intervenire in caso di problemi del sistema di guida autonoma e in caso di problemi riscontrati in altri veicoli.
4. Alta automazione: il sistema di guida autonoma ha il completo controllo sui movimenti del veicolo, con un controllo sempre circoscritto da un ODD, senza la possibilità che il guidatore intervenga in caso di problemi.
5. Completa automazione: il sistema di guida autonoma ha il completo controllo del veicolo senza essere limitato da un ODD.

2.1.2 Livelli e tecnologie

A ciascun livello di autonomia sono associate una serie di tecnologie o funzionalità che il veicolo in questione è in grado di supportare e per ciascuna funzionalità è associato un tipo di sensore. Al livello 1 le funzionalità principali che devono essere supportate dal veicolo sono l'Adaptive Cruise Control (ACC) e il Lane Departure Warning System (LDWS). Per quanto riguarda l'ACC, si tratta di una tecnologia in grado di mantenere una velocità predefinita e una distanza di sicurezza dai veicoli vicini. L'LDWS è invece una funzionalità che analizza la segnaletica orizzontale lungo la strada e lancia un allarme nel caso di un involontario cambiamento di corsia.

Al livello 2, oltre alle funzionalità già presenti ai livelli precedenti si aggiungono il Lane Keep Assist (LKA) e il Park Assist (PA). Per quanto riguarda l'LKA può essere vista come una tecnologia complementare all'LDWS, in quanto interviene nel caso in cui il guidatore non agisca per evitare un cambiamento di corsia improvviso. In generale, esso agisce per fare in modo che il veicolo si mantenga al centro della corsia, interagendo con il volante ed evitando che il veicolo stesso cambi corsia involontariamente o che collida con oggetti presenti a lato del veicolo. Per quanto riguarda invece il PA, ne esistono di diverse tipologie, quella più comune fornisce degli avvisi al guidatore sulla manovra che esso sta eseguendo.

Al livello 3 il veicolo acquisisce una maggiore autonomia, per cui le funzionalità aggiunte sono Automatic Emergency Braking (AEB), Driver Monitoring (DM), Traffic Jam Assist (TJA). AEB è una funzionalità che aiuta nella prevenzione di incidenti: infatti essa avvisa il guidatore di un impatto imminente e fa in modo di facilitare la frenata del veicolo, anche applicando il freno indipendentemente dalla volontà del guidatore se la situazione risulta particolarmente critica. DM è una funzionalità che monitora l'attenzione del guidatore attraverso sensori o videocamere. Se il livello di attenzione del guidatore risulta inferiore ad una certa soglia ed una situazione di emergenza viene rilevata, esso avvisa il guidatore attraverso luci intermittenti o suoni e, nel caso in cui il guidatore non reagisca, esso agisce sul veicolo, portandolo in una situazione di sicurezza con delle manovre a basso rischio. Il TJA aiuta a controllare il veicolo nel traffico: se abilitato, è infatti in grado di frenare, far partire il veicolo, mantenere una distanza di sicurezza e mantenere il veicolo sulla corsia, senza alcun intervento da parte del guidatore.

La maggiore differenza tra il livello 3 e il livello 4 riguarda il fatto che, in quest'ultimo, in caso di una situazione di emergenza è il sistema di guida autonomo a prendere il controllo del veicolo, mentre nel caso precedente è sempre richiesto l'intervento del guidatore in caso di una situazione critica. Di conseguenza la tecnologia non cambia particolarmente rispetto al livello precedente, se non per quanto riguarda gli algoritmi utilizzati internamente dal sistema di guida autonomo e per quanto riguarda il comportamento dei sensori: in questo caso infatti vengono presi i dati provenienti da tutti i sensori e combinati per avere una maggiore comprensione di cosa stia succedendo.

Per quanto riguarda l'ultimo livello, la macchina dovrebbe essere in grado di gestire qualsiasi situazione di pericolo, tanto che infatti dal veicolo vengono rimossi sia il volante che i pedali. La tecnologia principale risulta essere l'Automatic Pilot (AP). Questo rappresenta essenzialmente la capacità da parte del veicolo di guidarsi, eseguire tutte le manovre correttamente e guidare in modo sicuro, senza alcun intervento da parte di un essere umano. In questo caso tutti i sensori e le tecnologie utilizzate sono integrate come una sola tecnologia e sono in grado di comunicare tra di loro [21].

2.1.3 Vantaggi e problematiche

Lo sviluppo di veicoli autonomi porta con se tutta una serie di vantaggi e di problematiche da tenere in considerazione. Tra i possibili vantaggi che deriverebbero dalla diffusione di questi veicoli è possibile citare quelli riportati nel seguito [22].

- Riduzione numero incidenti: in tutto il mondo si registrano 1.25 milioni di incidenti mortali ogni anno ed è stato provato che nel 90% dei casi la colpa è da ricercarsi nel guidatore del veicolo. Sotto questo punto di vista la rimozione della componente umana nella guida del veicolo potrebbe andare a modificare pesantemente queste statistiche. Per esempio un recente studio portato avanti in Inghilterra dalla "Society of Motor Manufacturers And Traders" (SMMT), ha stimato che, nel 2030, un aumento del 25% nel numero di veicoli autonomi nella sola Inghilterra, comporterebbe 2500 persone in più in vita ogni anno ed una riduzione del numero di incidenti pari a 25.000 ogni anno.
- Aumento produttività: le persone sarebbero in grado di occuparsi di altro durante la guida.

- Riduzione delle emissioni nocive per l'ambiente.
- Riduzione congestione del traffico.

Tuttavia a fronte di tutte queste considerazioni positive, ci sono alcune problematiche e ostacoli che non possono essere ignorati.

- Errori tecnologici: l'eliminazione dell'errore umano, non implica l'eliminazione dell'errore tecnologico. Infatti la probabilità di un difetto di tipo tecnico rimane comunque alta, a maggior ragione considerando la complessità sempre maggiore degli algoritmi utilizzati da questi veicoli.
- Moralità del veicolo: bisogna stabilire delle regole per definire come gli algoritmi dovrebbero essere programmati, se prioritizzare la sicurezza dell'attuale occupante del veicolo autonomo, in qualsiasi situazione, oppure se prendere una decisione basata su altri fattori. Ma quali questi fattori siano non è ancora del tutto chiaro.
- Responsabilità: nel caso di incidente, in un veicolo non autonomo, la responsabilità ricade sul guidatore, ma nel caso di un veicolo autonomo, il guidatore non è più in controllo del mezzo. Di conseguenza è necessario capire in quale misura la responsabilità ricada sul veicolo stesso ed eventualmente sulla società produttrice del veicolo.
- Privacy: nei veicoli autonomi possono venire raccolti vari dati dalla società costruttrice del veicolo, ma occorre chiarire il motivo per cui questi dati vengono raccolti e l'uso che se ne fa.
- Cybersecurity: c'è sempre la possibilità che utenti malintenzionati accedano alle informazioni del veicolo e vadano a modificarne il comportamento, mettendo a rischio la vita dell'utilizzatore [17].
- Struttura: un veicolo autonomo utilizza algoritmi di computer vision che si basano sulla segnaletica stradale, per cui potrebbero sorgere problemi in termini di sicurezza del veicolo, nel caso di segnaletica orizzontale rovinata.
- Prezzo: inizialmente, il costo di queste nuove tecnologie sarebbe elevato; tuttavia, con il passare del tempo i costi di produzione e di acquisto dovrebbero ridursi [21].

Tutte queste problematiche nel corso degli ultimi anni sono state oggetto di vari studi e considerazioni dal punto di vista normativo e di esperienza utente del guidatore.

2.1.4 Previsioni future

Attualmente varie funzionalità di guida autonoma a basso livello, come per esempio il PA, sono attualmente utilizzabili e già disponibili in commercio. Oltre a ciò, molte aziende sono attualmente al lavoro per lo sviluppo di tecnologie e algoritmi per veicoli autonomi sempre più sofisticati. Nel 2016 General Motors ha acquisito Cruise Automation, azienda dedicata allo sviluppo di veicoli autonomi per 581 milioni di dollari e attualmente sono in fase di testing i primi prototipi di veicoli autonomi in varie città statunitensi in California, Arizona e Michigan, con la prospettiva di lanciare molto a breve i primi prodotti sul mercato.

Ford nel 2019 ha investito 15 milioni di dollari nella creazione di un centro di ricerca sui veicoli autonomi all'università statunitense di Carnegie Melon. Questo centro si occuperà nel corso dei prossimi 5 anni del miglioramento della tecnologia di guida autonoma. Entro la fine del 2019 si prevede l'inizio della fase di testing per un centinaio di veicoli. Volvo dal 2016 sta lavorando insieme a Uber per lo sviluppo di veicoli autonomi ed in particolare la compagnia fornisce a Uber i veicoli per il testing su strada in Arizona ed in Pennsylvania.

Tesla ha già sviluppato un sistema di guida autonoma a livello 4 in grado di muoversi autonomamente in autostrada e si prevede che entro il 2020 entreranno in fase di produzione veicoli completamente autonomi [23].

In conclusione nonostante tutte le problematiche citate nelle sezioni precedenti ancora da affrontare, è probabile che già nel corso dei prossimi 10 anni questi veicoli faranno la loro comparsa sul mercato.

2.2 Interazione veicolo autonomo-pedone

Per tutto ciò che è stato detto nella precedente sezione, è ormai ragionevole aspettarsi che nel corso dei prossimi anni i primi prototipi di veicolo completamente autonomo cominceranno ad essere venduti sul mercato di massa e ci si troverà di fronte ad uno scenario urbano completamente mutato. Uno dei problemi ancora aperti è quello che riguarda le modalità di interazione tra veicolo autonomo ed essere umano. Tutti i vantaggi che sono stati discussi in precedenza relativamente a quello che potrebbe essere il rapporto tra un veicolo autonomo ed un essere umano (riduzione numero incidenti, aumento

produttività, ecc.), saranno realtà solo se la guida autonoma sarà accettata in modo incondizionato da tutti gli utenti della strada [1]. Qualsiasi violazione delle aspettative dell'utente comporterà una riduzione del livello di fiducia nei confronti del veicolo autonomo [24]. La ricerca nel corso degli ultimi anni si è focalizzata principalmente sullo studio di interfacce lato utenti a bordo del veicolo autonomo, progettate per essere in grado di fornire un feedback sulle intenzioni del veicolo autonomo stesso. Tuttavia, un ambito su cui ci sono varie questioni ancora aperte è quello che riguarda l'interazione tra veicolo autonomo e pedone. La sostituzione del guidatore umano con un sistema autonomo comporta l'eliminazione di una componente sociale fondamentale: infatti, gli esseri umani in contesti urbani, oltre che sulla base di regole del codice della strada, agiscono sulla base di una comunicazione informale con gli altri utenti della strada, eventualmente mediata dal veicolo stesso, nel tentativo di far comprendere le proprie intenzioni all'altra persona, per evitare situazioni di ambiguità. Tutto ciò con i veicoli autonomi viene a mancare [25]. Per capire quali possano essere i metodi di comunicazione migliori tra veicolo autonomo e pedone è necessario innanzitutto andare a studiare i metodi di comunicazione base tra guidatore umano e pedone.

2.2.1 Interazione tra guidatore e pedone

La comunicazione tra veicolo e pedone può essere distinta in formale e informale. Quella formale sfrutta i meccanismi di segnalazione standard per esprimere le proprie intenzioni al pedone ovvero luci di emergenza, luci di frenata e l'uso del clacson. Per quanto riguarda la comunicazione informale ci sono diverse opzioni a disposizione. Un pedone è infatti in grado di prevedere il comportamento di un veicolo basandosi sulle sue caratteristiche fisiche: generalmente infatti una macchina sportiva avrà un comportamento differente rispetto ad una berlina [26]. Allo stesso modo il pedone è in grado di prevedere il comportamento del veicolo sulla base del suo movimento: è stato infatti dimostrato che il movimento stesso del veicolo è in grado di generare una reazione emotiva nel pedone. Ed è proprio questa reazione a permettere al pedone di prendere una decisione razionale su come comportarsi. Per esempio, una leggera decelerazione del veicolo aiuta il pedone a comprendere meglio le intenzioni del guidatore e di conseguenza a decidere se attraversare la strada oppure attendere che il veicolo passi oltre [27]. A questo tipo di comunicazione si affianca un tipo di comunicazione non verbale tra pedone e guidatore del veicolo che si può suddividere in due tipologie.

- Espressioni facciali e contatto visivo: il contatto visivo tra guidatore e guidatore o tra guidatore e altri utenti della strada, gioca un ruolo fondamentale: infatti, i pedoni che vogliono attraversare sfruttano il contatto visivo per capire se il guidatore si è reso conto delle loro intenzioni oppure no.
- Gestii e movimenti del corpo: i gesti sono un metodo di comunicazione particolarmente efficace e diffuso tra utenti della strada. La maggior parte di questi segnali sono generalmente comprensibili e chiari per gli utenti [26].

Detto ciò, è evidente che per definire l'interazione tra un veicolo autonomo ed un generico pedone è possibile considerare diverse tipologie di interazione, quali ad esempio:

- interazione informale basata sul movimento del veicolo;
- display esterni montati sul veicolo;
- interazione basata su meccanismi acustici;
- interazione basata su elementi inseriti nell'infrastruttura stradale
- interazione basata su meccanismi di realtà aumentata.

Nei prossimi paragrafi verranno analizzate singolarmente queste modalità di interazione, attraverso l'analisi di una serie di studi in letteratura.

2.2.2 Interazione basata sul movimento del veicolo

Gli studi sulle possibili modalità di interazione tra veicolo autonomo e pedone sono confluiti in una serie di considerazioni su come progettare al meglio le caratteristiche e le interfacce dei veicoli autonomi per migliorare l'interazione coi pedoni. Una caratteristica dei veicoli autonomi che rappresenta allo stesso tempo un metodo di comunicazione informale è il tempo di frenata di un veicolo in presenza di un ostacolo. Per capire in che modo i tempi di frenata incidano nell'interazione, il primo passo è andare a studiare quali sono i tempi di frenata accettabili dal punto di vista del pedone. Questi possono essere ricavati da due misure empiriche [1]. La prima è la stima del TTA (Time to Arrival), ovvero il tempo rimanente prima che il veicolo raggiunga una certa posizione. Il TTA è considerata un'informazione fondamentale affinché il pedone possa prendere la decisione se attraversare o meno. Tuttavia, la

decisione finale viene presa sulla base del “gap acceptance” ovvero l’intervallo di tempo che il pedone considera come accettabile per affrontare un attraversamento in sicurezza. Sono diversi i fattori che influenzano queste misure e tra questi sono da citare la dimensione del veicolo, la sua velocità e l’età stessa del pedone che sta effettuando queste misure. Per fare in modo che la frenata del veicolo sia percepita come un segnale informale per il pedone, bisogna fare in modo che le tempistiche di frenata vengano adattate alle curve raffigurate in Fig. 2.1 e in Fig. 2.2. Dalla Fig. 2.1 è possibile dedurre che gli intervalli di tempo accettabili non differiscono eccessivamente tra veicoli di grandi dimensioni e veicoli di piccole dimensioni per velocità al di sotto dei 20 km/h. Per velocità uguali o superiori ai 30 km/h, al contrario, sono richiesti intervalli di tempo inferiori per veicoli di grandi dimensioni rispetto a quelli di piccole dimensioni, mentre la situazione si capovolge intorno ai 25 km/h.

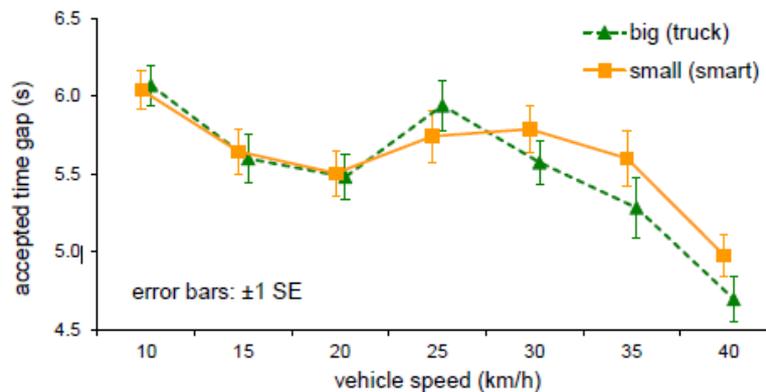


Fig. 2.1. Intervalli di tempo ottimali per veicoli di grosse e piccole dimensioni a differenti livelli di velocità [1].

Gli effetti dell’età sulle scelte dei pedoni sono invece raffigurati in Fig. 2.2, da cui si può dedurre che pedoni più anziani tendono ad individuare intervalli di tempo accettabili per l’attraversamento più prudenti rispetto a pedoni di età inferiore. Questo implica che in realtà nella progettazione dei meccanismi di frenata, bisognerebbe anche essere in grado di tener conto dell’età dei pedoni che si avvicinano ad un incrocio di fronte ad un veicolo autonomo. Un compito questo relativamente impossibile da gestire anche per i moderni sensori.

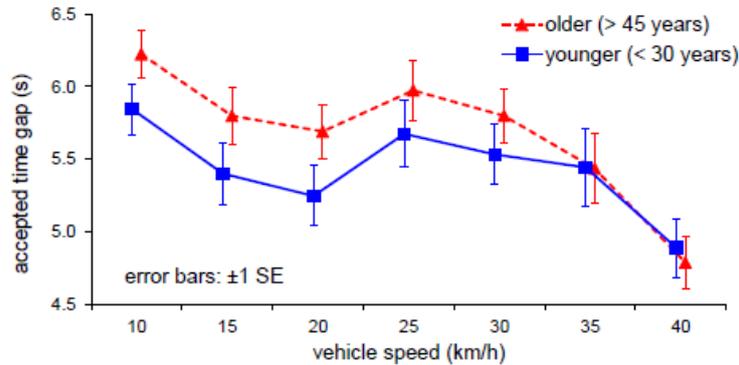


Fig. 2.2. Intervalli di tempo ottimali per gruppi di diversa età a differenti livelli di velocità [1].

2.2.3 Display esterni

Il meccanismo di comunicazione implicito nel movimento del veicolo, presentato nel paragrafo precedente, potrebbe non essere sufficiente per garantire un'interazione efficiente tra veicolo autonomo e pedone. Tuttavia, nel corso degli ultimi anni sono state studiate una serie di interfacce montate esternamente al veicolo autonomo che forniscono al pedone degli indizi sul comportamento futuro del veicolo stesso. Il primo design di interfaccia che verrà analizzato è stato presentato in [2]. Questo design, denominato “Eyes on a car”, è nato dall'idea di sostituire il contatto visivo tra pedone e guidatore di un veicolo tradizionale, con degli occhi montati al posto delle luci anteriori del veicolo. L'interfaccia opera in questo modo: nel momento in cui i sensori del veicolo autonomo percepiscono un pedone con l'intenzione di attraversare e il veicolo autonomo prende in carico il pedone, gli occhi si fissano entrambi sul pedone, nel tentativo di sostituire il contatto visivo con un essere umano come mostrato in Fig. 2.3.

Se invece il veicolo autonomo non ha alcuna intenzione di fermarsi, gli occhi guardano fissi di fronte al veicolo. I test effettuati in un ambiente di realtà virtuale hanno dimostrato come un'interfaccia di questo tipo permetta al pedone di decidere più velocemente se attraversare o meno, nel momento in cui gli occhi lo fissano. Tuttavia se confrontato con altre tipologie di interfacce, è stato dimostrato che in molti casi questo design viene percepito dai pedoni

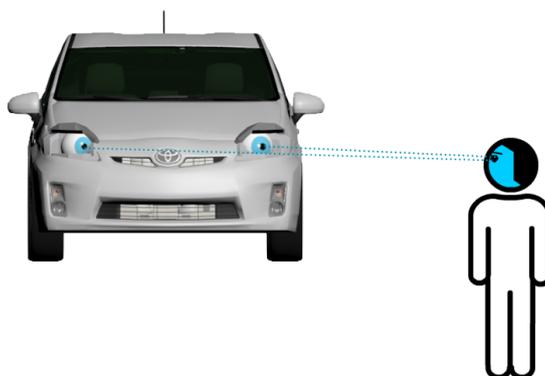


Fig. 2.3. Eyes on a car - Concept di interazione [2].

come non affidabile, non sicuro da utilizzare e alcuni utenti hanno sperimentato l'effetto Uncanny Valley [8]. Questa interfaccia è stata poi utilizzata in un prototipo di veicolo autonomo sviluppato da un gruppo di ricercatori di Jaguar Land Rover [3]. Il prototipo è mostrato in Fig. 2.4.



Fig. 2.4. Eyes on a car - Prototipo [3].

A questo design che richiama il contatto visivo, si affiancano una serie di design che richiamano la metafora del semaforo, conosciuta da tutti i pedoni. Il primo concept consiste in una striscia di LED posta nella parte anteriore del veicolo come mostrato in Fig. 2.5 [4].

Questi LED si possono accendere secondo due differenti pattern:

- GYR (Green, Yellow, Red): rosso quando l'attraversamento è pericoloso, verde quando è sicuro attraversare e giallo nello stadio intermedio.

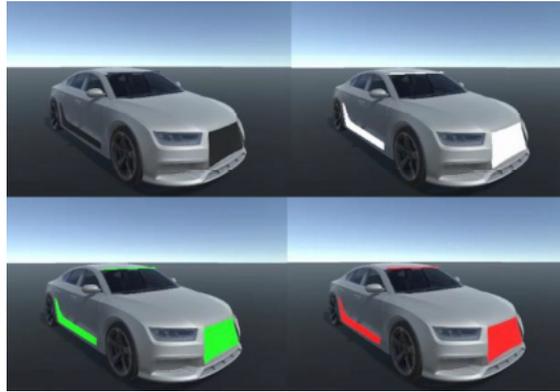


Fig. 2.5. Accensione LED: Nessun warning (in alto a sinistra), warning bianco (in alto a destra), warning verde (in basso a sinistra), warning rosso (in basso a destra) [4].

- WRR (White, Flashing Red, Red): bianco quando è sicuro attraversare, rosso quando è invece pericoloso e rosso lampeggiante nello stadio intermedio.

Gli studi effettuati su questo design hanno effettivamente dimostrato come i pedoni si rendano conto del pericolo, associando correttamente i colori al messaggio inviato dal veicolo autonomo.

Il secondo design basato sulla suddetta metafora è caratterizzato da un tradizionale semaforo composto da quattro differenti indicazioni luminose, la cui accensione e spegnimento dipendono dalla posizione del veicolo: blu, è sicuro attraversare, giallo, non è consigliato attraversare, rosso, è pericoloso attraversare, verde posizione di partenza del veicolo [5].

Anche per questa interfaccia è stato dimostrato come le indicazioni mostrate dal semaforo abbiano un effetto positivo sul comportamento dei pedoni in presenza dell'incrocio.

Un'altra tipologia di interfaccia che si è dimostrata intuitiva per i pedoni in diversi studi, consiste in una striscia di LED montata in diverse sezioni del veicolo autonomo, solitamente sopra o ai lati del parabrezza. Un esempio di questa tipologia di interfacce è la cosiddetta AVIP (Autonomous Vehicle Interaction with Pedestrian) [6, 7]. Il sistema AVIP, visibile in Fig. 2.7, consiste in una striscia di LED montata nella parte superiore del parabrezza che interagisce con i pedoni attraverso pattern luminosi: quando il veicolo è in

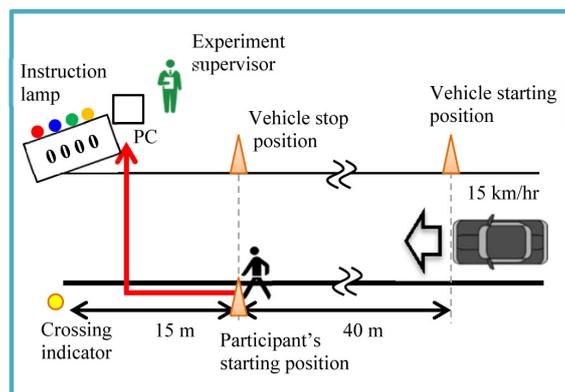


Fig. 2.6. Schema di funzionamento dell'interfaccia [5].

modalità autonoma solo i LED centrali sono accesi; quando invece il veicolo individua un pedone le luci si accendono consecutivamente dal centro verso l'esterno; infine quando il veicolo sta aspettando che il pedone attraversi, tutte le luci sono accese contemporaneamente, infine quando sta per ripartire, le luci si spengono dall'esterno fino alla parte centrale.



Fig. 2.7. Prototipo AVIP [6, 7].

I test effettuati su questa interfaccia, realizzati con un finto veicolo autonomo, sfruttando la tecnica denominata “Wizard of Oz”[6], hanno dimostrato che gli utenti, dopo un breve training sul funzionamento dell'interfaccia, sono stati in grado di interpretare i segnali inviati dall'interfaccia e di conseguenza interagire col veicolo autonomo in diverse situazioni nel traffico.

Sempre facenti parte della stessa tipologia di interfaccia, si ritrovano una serie di strisce LED montate in diverse parti del veicolo. Queste strisce sono tutte interfacce diverse tra di loro ma accomunate da una stessa caratteristica: nel momento in cui un pedone ha l'intenzione di attraversare e il veicolo

autonomo lo prende in carico, le strisce LED si illuminano nella direzione dove si trova il pedone [28, 29, 30, 31, 32, 33]. Ognuna di queste interfacce si differenzia sulla base di diversi paradigmi di funzionamento: vi è quella che accende un gruppo di LED nella direzione in cui si trova l'utente e, mano a mano che l'utente si sposta lungo l'attraversamento pedonale, questa aggiorna il gruppo di LED attivi sulla base della posizione dell'utente, quella che cambia colore sulla base dello stato interno del veicolo autonomo, ecc. In Fig. 2.8 è possibile vedere un esempio di questa tipologia di interfaccia.



Fig. 2.8. Interfaccia basata su LED in realtà virtuale [8].

Confrontato con altre tipologie di interfacce questa si è dimostrata una delle migliori in termini di intuitività per i pedoni, per la sua non ambiguità, nonostante il continuo feedback fornito dall'interfaccia non sia particolarmente utile per gli utenti [8].

Queste interfacce caratterizzate da strisce di LED che si accendono secondo un particolare pattern hanno trovato una possibile applicazione anche nei cosiddetti SAV (Shared Automated Vehicles), ovvero i veicoli autonomi condivisi, tra cui i classici mezzi pubblici [34]. La comunicazione tra questi mezzi e i pedoni, detta SAV2P, può essere realizzata attraverso quattro colonne di LED, posizionate a ciascun angolo del SAV, che comunicano in questo modo:

- il veicolo non si sta fermando: la luce risulta giallo lampeggiante;
- il veicolo si sta fermando: compare una luce blu che si sposta dall'alto verso il basso;
- il veicolo è in attesa: i LED presentano una luce blu in dissolvenza;
- il veicolo sta ripartendo: si sente il suono di una campanella e successivamente compare una luce gialla lampeggiante.

E' stato dimostrato che i pedoni si trovano maggiormente a loro agio se il veicolo presenta un'interfaccia di questo tipo, rispetto al caso in cui non presenti l'interfaccia.

Proseguendo il discorso sulle interfacce semplici, costituite da pannelli LED montati sul veicolo, un'altra tipologia è quella che presenta un pannello LED nella parte frontale del veicolo, denominata "Smiling car".



Fig. 2.9. Interfaccia Smiling car [8].

Il pannello mostra una linea retta quando il veicolo non ha preso in carico alcun pedone. Questa linea retta si piega e si converte in un sorriso nel momento in cui il veicolo prende in carico un pedone, come visibile in Fig. 2.9. Confrontata con altre interfacce è stato dimostrato come questa sia una delle migliori per la sua semplicità e per il fatto che fornisca ai pedoni un'informazione non ambigua ed intuitiva [8, 35, 36].

Un'altra tipologia di interfaccia la cui semantica si distacca dalle strisce di LED viste precedentemente è quella che fornisce un'indicazione esplicita al pedone su come comportarsi. Questa interfaccia è stata coniugata in diversi prototipi nel corso degli anni, che presentano una serie di caratteristiche comuni: si tratta sempre di un pannello posto nella parte anteriore del veicolo, che mostra una scritta, tipicamente in inglese, che può fornire indicazioni al pedone su come comportarsi (ad esempio, "Cross Now") [9, 37, 38, 39], come visibile in Fig. 2.10, oppure informazioni sullo stato interno del veicolo (ad esempio, "Braking") [35], per permettere al pedone di comportarsi di conseguenza.

Confrontato con altre interfacce tuttavia questo metodo di comunicazione esplicito non risulta uno dei migliori, sia per possibili problemi linguistici, sia



Fig. 2.10. Prototipo di interfaccia esplicita [9].

per le dimensioni del display, dovendo avere queste dimensioni notevoli affinché il testo sia leggibile chiaramente [8]. Un'ultima tipologia di interfaccia fa uso di gesti per definire l'interazione tra pedone e veicolo autonomo. L'idea alla base dell'interfaccia è che nel momento in cui l'utente vuole effettuare l'attraversamento comunica la sua intenzione al veicolo autonomo. Il veicolo può presentare un classico pannello LED nella parte frontale, che cambia colore per indicare al pedone che l'attraversamento è sicuro, senza però fornire alcun feedback esplicito che il gesto sia stato effettivamente recepito dal veicolo [40]; in alternativa, può presentare sempre un pannello LED che diventa verde, però assumendo la forma della figura del pedone che ha effettuato il gesto, fornendo così un feedback più esplicito sul fatto che il gesto sia stato recepito dal veicolo [41].

Le interfacce presentate in questo paragrafo sono tutte caratterizzate dalla presenza di un pannello esterno posizionato sul veicolo autonomo e forniscono tutte un indizio puramente visivo su come il pedone dovrebbe comportarsi. Tuttavia, se utilizzate singolarmente, queste interfacce presentano come problematica principale quella di non essere pienamente operative in qualsiasi condizione meteo, ma soprattutto di non essere visibili a grandi distanze (in particolare questo vale per interfacce come AVIP o Eyes on a car) o in generale di non essere sufficientemente intuitive. In altri lavori si tende a combinare gli indizi visivi che esse forniscono con altre tipologie di indizi. Questi possono essere indizi uditivi oppure indizi basati sull'infrastruttura stradale, che forniscono informazioni aggiuntive al pedone. Queste interfacce alternative verranno analizzate nei paragrafi successivi.

2.2.4 Proiezioni

Un'altra tipologia di interfaccia è quella rappresentata da proiezioni prodotte sul terreno dal veicolo, per indicare al pedone se il veicolo lo abbia preso in carico o meno. In [10] è stato presentato un prototipo di interfaccia di questo tipo che è stata definita “assoluta”. Questa, montata su un finto veicolo autonomo, proietta sul terreno delle linee in orizzontale che si fondono tra di loro quando il veicolo sta decelerando e, al contrario, si separano quando il veicolo sta accelerando. A ciò si aggiunge una freccia di fronte a queste strisce che, nel caso in cui il veicolo si trovi a svoltare in una direzione, mostra l'esatta posizione da cui il veicolo inizierà a svoltare, come mostrato in Fig. 2.11.



Fig. 2.11. Prototipo di interfaccia proiettata sul terreno [10].

Questo prototipo di interfaccia ha dimostrato che effettivamente tali indicazioni permettono al pedone di decidere più rapidamente se attraversare o meno; tuttavia, lo svantaggio è che il pedone concentra la sua attenzione sul capire l'indicazione proiettata sul terreno ma non sul veicolo stesso.

In [42] è stato invece sviluppato il design di un'interfaccia proiettata sul terreno che opera come riportato di seguito.

- Il veicolo è in movimento e non ha preso in carico alcun pedone: il veicolo proietta sul terreno un pattern ad onde di colore rosso.
- Il veicolo prende in carico un pedone e comincia a rallentare: il pattern proiettato cambia colore e diventa giallo.
- Il veicolo si è completamente fermato, è sicuro per il pedone attraversare: il pattern si trasforma in una serie di strisce pedonali di colore verde.

- Il veicolo è fermo ma sta per ripartire: il colore delle strisce si tramuta in rosso.

Dal confronto tra questa tipologia, visibile in Fig. 2.12, e altre interfacce è evidente come queste proiezioni non siano in grado di operare in tutte le tipologie di terreno e con qualsiasi condizioni ambientale [8].



Fig. 2.12. Proiezione di strisce pedonali sul terreno [8].

Tuttavia, è stato dimostrato in particolare che design come quello in [42] sfruttano un concetto con cui i pedoni hanno sicuramente familiarità, ovvero quello delle strisce pedonali. Tuttavia, è stato dimostrato che questa interfaccia presenta un carico mentale eccessivo per il pedone.

2.2.5 Smart road

Le cosiddette “Smart road” forniscono una serie di input aggiuntivi ai pedoni e agli altri utenti della strada che desiderano effettuare l’attraversamento in sicurezza. Si tratta di interfacce incapsulate nell’interfaccia stradale stessa, con una serie di indizi visivi che mostrano quando è sicuro attraversare, facendo comparire delle strisce in corrispondenza dell’attraversamento (Fig. 2.13), oppure segnalano la presenza di veicoli sulla strada ed indicano quando è sconsigliato attraversare per i pedoni (Fig. 2.14). Un prototipo di interfaccia di questo tipo è stato realizzato nella zona sud-ovest di Londra e consiste in una serie di pannelli LED, inseriti all’interno di pannelli di plastica che formano il manto stradale [11].



Fig. 2.13. Prototipo di Smart road: in questo caso è sicuro attraversare [11].

Rispetto ad altre interfacce, è stato dimostrato come questa sia quella percepita come la più sicura, la più affidabile e con cui gli utenti hanno avuto la migliore user experience. Il problema principale di un'interfaccia di questo tipo sarebbero chiaramente i costi necessari per adeguare l'intera infrastruttura stradale [8].

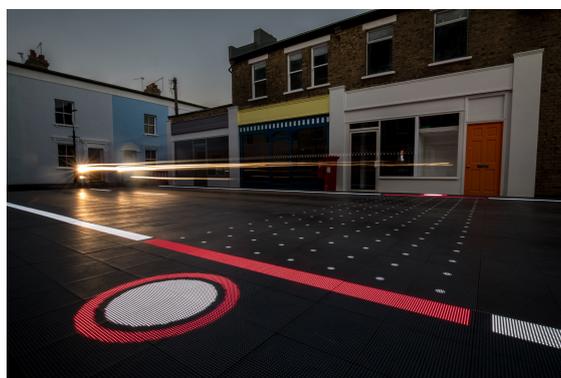


Fig. 2.14. Prototipo di Smart road: in questo caso è vietato attraversare [11].

2.2.6 Combinazioni di indizi

Come detto in precedenza, le interfacce LED e le proiezioni presentano in generale una serie di svantaggi che non le rendono utilizzabili in tutte le situazioni: diverse condizioni climatiche o scarsa visibilità possono infatti

influenzare l'usabilità di alcune di quelle che sono state elencate prima, ma anche l'attraversamento da parte di utenti con disabilità visive può essere impedito dall'utilizzo di uno schermo LED montato sul veicolo. Molti dei prototipi visti in precedenza affiancano all'indizio visivo dato dall'interfaccia montata sul veicolo, altre tipologie di indizi.

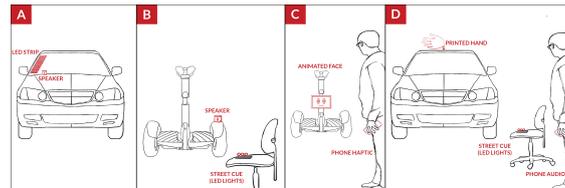


Fig. 2.15. Diverse combinazioni di indizi: A - Indizio Visivo e uditivo montato sul veicolo, B - Indizio uditivo montato sul veicolo e indizio visivo nell'infrastruttura stradale, C - Indizio visivo montato sul veicolo e Indizio tattile in un dispositivo personale dell'utente, D - Combinazione dei casi elencati in precedenza.

Le varie combinazioni studiate, ad esempio in [43] e visibili in Fig. 2.15, sono illustrate di seguito.

- Interfaccia installata solo sul veicolo: in questo caso la responsabilità di comunicare con il pedone ricade esclusivamente sul veicolo stesso. L'interfaccia è costituita come base da un indizio visivo (come un pannello LED) e da un indizio sonoro, costituito da un altoparlante che indica le intenzioni del veicolo: nel momento in cui sta per fermarsi l'altoparlante riproduce la frase "about to stop" e similmente per quando il veicolo sta per ripartire.
- Interfaccia installata sul veicolo e sull'infrastruttura stradale: in questo caso il design separa la responsabilità dell'interazione tra veicolo autonomo e infrastruttura stradale. Nell'infrastruttura può essere installato un semaforo o una soluzione smart road che comunichi informazioni sulle intenzioni del veicolo, mentre sul veicolo può essere installata una delle varie interfacce descritte precedentemente.
- Interfaccia installata sul veicolo e su un dispositivo del pedone: in questo caso viene sfruttato un dispositivo personale del pedone per comunicare le intenzioni del veicolo, per esempio attraverso una vibrazione del dispositivo stesso.

- Interfaccia mista: ovvero una combinazione delle precedenti interfacce con indizi visivi e uditivi forniti dal veicolo autonomo, indizi associati all’infrastruttura stradale e indizi provenienti da un dispositivo personale del pedone.

I test hanno dimostrato che gli indizi visivi funzionano correttamente, con tutte le limitazioni sottolineate in precedenza; gli indizi uditivi possono essere un complemento accettabile degli indizi visivi, ma risultano impossibili da applicare nel mondo reale, in cui con un numero elevato di veicoli autonomi tutti questi altoparlanti creerebbero confusione. Gli indizi come la vibrazione del dispositivo personale sono stati considerati eccessivamente ambigui: non è infatti possibile riuscire a distinguere la vibrazione legata ad un avviso inviato dal veicolo autonomo, da quella legata ad una qualsiasi altra applicazione installata sul dispositivo [43]. Una combinazione vincente potrebbe essere l’unione tra le Smart road e le interfacce montate sul veicolo. Infatti, in [8] è stato dimostrato che quello di Smart road, come concetto è particolarmente apprezzato dagli utenti, che tuttavia preferirebbero avere degli indizi aggiuntivi sotto forma di interfacce posizionate sul veicolo autonomo, oltre che sull’infrastruttura stradale.

2.2.7 Interfacce in realtà aumentata

Con gli avanzamenti tecnologici delle applicazioni di realtà aumentata e l’incremento della disponibilità di hardware di questo tipo, è possibile immaginare che in futuro tutti i pedoni che si spostano per le strade saranno dotati di dispositivi in realtà aumentata personali, alla stregua di quanto accade oggi con alcuni dispositivi personali (ad esempio smartphone). Ciò offre la possibilità di progettare nuove soluzioni per l’interazione coi veicoli autonomi, che cerchino in qualche modo di superare le problematiche delle altre interfacce viste in precedenza. In [12] sono stati sviluppati tre diversi design per possibili interfacce in realtà aumentata.



Fig. 2.16. Primo design - Percorso pedone e direzione veicoli [12].

Il primo di questi design permette al pedone di avere un'idea sul percorso più sicuro da seguire e sulla direzione di movimento dei veicoli e sul loro spazio di frenata, indicato dalle frecce gialle davanti al veicolo. Non viene fornita alcuna informazione sullo stato del traffico come visibile in Fig. 2.16.



Fig. 2.17. Secondo design - Safe zone [12].

Il secondo design, invece, identifica le cosiddette “safe zone”, delle zone all'interno delle quali è sicuro effettuare l'attraversamento, identificate dal colore verde, rispetto a quelle in cui è pericoloso, identificate dal colore rosso mostrato nei pressi del veicolo come visibile in Fig. 2.17.



Fig. 2.18. Terzo design - Safe zone e direzione veicoli [12].

Infine, il terzo design è una combinazione dei primi due e mostra sia le zone sicure sia la direzione di movimento dei veicoli, come visibile in Fig. 2.18. Il terzo design è quello che è stato maggiormente apprezzato dagli utenti in fase di validazione (avvenuta mostrando immagini statiche rappresentanti le interfacce) nonostante il grande numero di informazioni fornite [12].

Capitolo 3

Tecnologie

Sulla base delle ricerche effettuate nell'analisi dello stato dell'arte, è evidente come il numero di confronti tra interfacce appartenenti a tipologie o tecnologie diverse, sia molto limitato. Di conseguenza può essere interessante sviluppare uno scenario di simulazione all'interno del quale inserire uno o più veicoli autonomi, caratterizzati da un comportamento realistico, e fare in modo che diversi utenti sperimentino diverse tipologie di interfacce. Per poter raggiungere lo scopo prefissato è fondamentale capire le tecnologie che stanno alla base del lavoro di tesi svolto, perchè la scelta del software per la simulazione, degli asset da utilizzare hanno influenzato enormemente i risultati del lavoro.

3.1 Unity e asset

Dal punto di vista tecnologico la prima sezione è dedicata all'engine utilizzato per la simulazione, ovvero Unity, e alla descrizione degli asset che hanno permesso di semplificare il lavoro sullo scenario.

3.1.1 Unity

Unity è un motore grafico multiplatforma sviluppato da Unity Technologies, una azienda di sviluppo software con sede a San Francisco, California. Unity è stato rilasciato nel Giugno 2005 gratuitamente e, oltre al fatto di essere gratuito, uno dei suoi punti di forza principali è proprio il fatto che supporta fino a 25 piattaforme differenti tra cui Windows, Mac, Linux, Xbox 360, Playstation 3 e così via. Può essere utilizzato per la produzione di videogiochi in due o tre dimensioni, in realtà aumentata o, di maggiore interesse

per questo lavoro di tesi, in realtà virtuale, ma è stato anche utilizzato in altri ambiti tra cui l'ingegneria, l'architettura e l'industria dell'automobile. Unity offre meccanismi di drag and drop per la realizzazione degli scenari. Per quanto riguarda la gestione della logica di gioco, esso offre una API proprietaria scritta in C#. Offre tra le altre cose uno store, a cui si può accedere e scaricare software o asset, tra cui modelli tridimensionali, animazioni, shader e così via, sviluppati da altri utenti e utilizzabili nelle proprie applicazioni. La versione del software utilizzata in questa tesi è 2019.3, la cui interfaccia è visibile in Fig. 3.1.

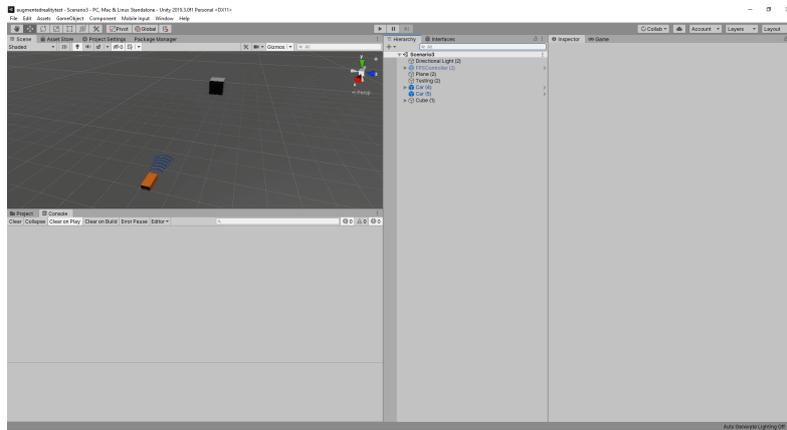


Fig. 3.1. Interfaccia di Unity3d.

3.1.2 AirSim e Windridge City

AirSim nasce come simulatore di droni, veicoli e altri mezzi. E' stato sviluppato su un Si tratta di un simulatore open source, multi-piattaforma e supporta hardware-in-the-loop con i più popolari controller di volo come PX4, per la realizzazione di simulazioni fisicamente e visivamente realistiche [44]. In particolare ciò che era di maggiore interesse per questa tesi era lo scenario che AirSim mette a disposizione gratuitamente, chiamato Windridge City, che può essere anche scaricato singolarmente dall'asset store di Unity. Questo scenario è caratterizzato da un ambiente cittadino circondato da una foresta, come visibile in Fig. 3.2. Può essere utilizzato per simulare diverse situazioni all'interno del traffico cittadino, motivo per il quale è stato sfruttato in questa tesi [13].



Fig. 3.2. Scenario Windridge City [13].

3.2 Tecnologie di Unity3d

In questa sezione verranno descritte alcune delle tecnologie messe a disposizione da Unity sia per migliorare le prestazioni dello scenario nella sua interezza, e per ottenere particolari effetti grafici.

3.2.1 Data-Oriented Technology Stack

Nel 2018 Unity Technologies ha annunciato di aver iniziato a lavorare allo sviluppo del nuovo Data-Oriented Technology Stack (DOTS). Si tratta di un nuovo paradigma di programmazione, basato sul design DOD (Data Oriented Design), che differisce enormemente dal classico design OOD (Object Oriented Design).

Il classico design OOD è incentrato sulla generazione e sulle operazioni su oggetti. Questo paradigma è vantaggioso dal punto di vista degli esseri umani perchè richiama il modo con cui gli essi interagiscono con la realtà. Tuttavia presenta lo svantaggio che le funzioni sono associate ad un particolare dato e non possono essere disgiunte da esso e riutilizzate. In Unity questo si converte nei GameObjects, aggregati di logica, mesh e tutti quegli elementi che caratterizzano un oggetto nel mondo virtuale come mostrato in Fig. 3.3.

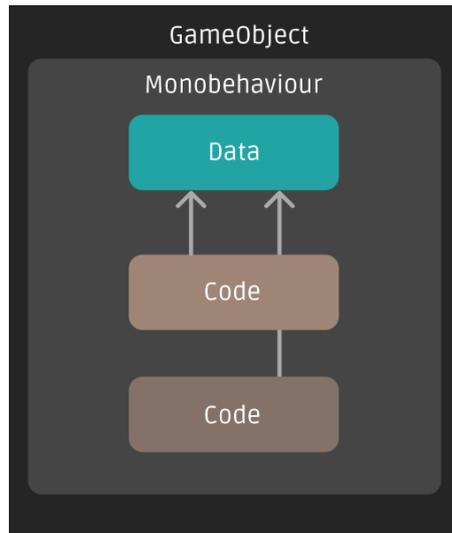


Fig. 3.3. Object Oriented Design in Unity.

Questi rappresentano porzioni di memoria a se stanti, separate tra di loro e ciò può essere inefficiente dal punto di vista dell'utilizzo di memoria.

Al contrario l'approccio DOD opera non con gli oggetti ma con i dati, separando le funzionalità dai dati stessi, che, al contrario in precedenza erano entrambi inclusi all'interno degli oggetti. Con questo paradigma le funzioni diventano general purpose e possono essere applicate a grandi blocchi di dati. Questo paradigma sfrutta le architetture di tipo SIMD (Single Instruction Multiple Data). Si tratta di un'architettura presente nella maggior parte dei processori in commercio, caratterizzata da una sola unità di controllo e da molteplici unità aritmetico-logiche (ALU). L'unità di controllo genera una istruzione per volta, mentre le molteplici macchine ALU permettono di operare simultaneamente su più flussi dati in parallelo [45]. Tutto ciò garantisce la possibilità di parallelizzare le operazioni sui dati più facilmente, dato che non si avranno più molti thread che vanno ad operare tutti su uno stesso oggetto. Un altro beneficio è dato dalla possibilità di sfruttare in modo efficiente la cache del calcolatore, dato che questo paradigma richiama continuamente le stesse funzioni più volte [46].

Su Unity, l'approccio DOD è stato applicato con il cosiddetto Entity Component System (ECS). Questo pattern architetturale si struttura attraverso le entità, i sistemi e i componenti, come mostrato in Fig. 3.4. Le entità vanno

a sostituire quelli che un tempo erano i GameObjects e sono aggregazioni di componenti. I componenti sono delle struct all'interno delle quali vengono memorizzati i dati che un tempo venivano inseriti nei GameObjects. Insiemi di componenti associati ad una entità vengono chiamati archetipi. I sistemi sono invece delle funzioni che vengono richiamate ad ogni update dell'engine per ogni entità con un determinato archetipo.

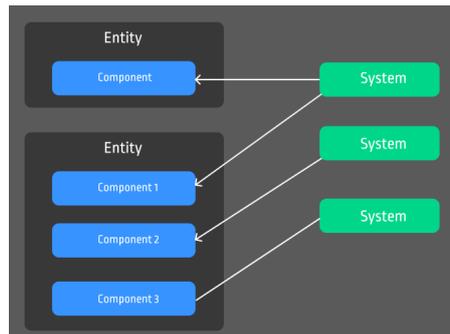


Fig. 3.4. Entity Component System in Unity.

Oltre all'Entity Component System, per supportare l'approccio DOD, Unity ha introdotto il nuovo C# Job System per gestire in modo efficiente il multithreading e il Burst Compiler che permette di generare codice nativo altamente ottimizzato. La combinazione di ECS, Job System e Burst Compiler garantisce prestazioni anche 2000 volte superiori rispetto al paradigma di programmazione base. Per facilitare il passaggio dal vecchio paradigma di programmazione al nuovo, Unity offre la possibilità di sfruttare il cosiddetto Hybrid ECS. Questo si differenzia dal Pure ECS per il fatto che il primo mantiene l'esistenza dei GameObjects nello scenario, però, grazie all'ausilio di script presenti in Unity, runtime questi GameObjects vengono convertiti automaticamente in entità, facilitando il lavoro del programmatore ma avendo come conseguenza un boost di prestazioni ridotto, rispetto alla controparte Pure ECS. Il vantaggio prestazionale è tanto maggiore quanto più alto è il numero di medesimi GameObjects che condividono la stessa logica e devono essere gestiti simultaneamente.

3.2.2 High Definition Render Pipeline

Dalla versione 2018.1 Unity ha introdotto un nuovo sistema chiamato Scriptable Render Pipeline (SRP), che permette al programmatore di personalizzare la propria pipeline di rendering sulla base dei requisiti del progetto.

SRP include due pipeline pronte per l'uso: la Lightweight (LWRP) e la High Definition (HDRP).



Fig. 3.5. Scenario renderizzato con HDRP.

HDRP è una pipeline grafica costruita per operare su piattaforme quali pc o console e che garantisce una elevata qualità visiva. Questa pipeline presenta varie caratteristiche come illustrato di seguito.

- **Rendering:** permette di renderizzare oggetti con grandi coordinate del mondo in un modo più robusto e stabile rispetto alla pipeline tradizionale.
- **Risoluzione Dinamica:** permette di renderizzare oggetti a diverse risoluzioni, usando tecniche hardware, se disponibili, oppure di renderizzare su render target che sono di dimensioni uguali o inferiori rispetto alla viewport corrente. Questo aiuta a mantenere un frame rate stabile della simulazione.
- **Nebbia volumetrica:** HDRP permette di definire un volume, un'area all'interno della quale definire effetti di post processing di vario tipo, e applicarvi un effetto di nebbia esponenziale con la possibilità di aggiungere l'effetto di volumetria ad essa.
- **Antialiasing:** a disposizione vi sono varie tipologie di antialiasing, ovvero aliasing temporale, multisample, fast approximate e subpixel morphological. Viene usato essenzialmente per eliminare l'effetto di aliasing e migliorare le prestazioni dell'applicazione.
- **Cielo:** HDRP permette di definire il cielo all'interno di un volume, in modo tale da cambiare le impostazioni del cielo o il tipo di cielo sulla base

della posizione della camera nella scena. Permette anche di separare il cielo che viene visto dalla camera da quello che viene usato per generare gli effetti di luce ambientale. Tra le varie tipologie di cielo a disposizione vi sono Gradient Sky, HDRI Sky, Physically based Sky e Procedural Sky.

- Riflessioni e rifrazioni: HDRP permette di calcolare riflessioni e rifrazioni della luce usando il depth buffer e il color buffer dello schermo, in modo tale da simulare il più realisticamente possibile il percorso che la luce segue viaggiando nella scena.
- Ombre: la gestione delle ombre con HDRP viene realizzata con diversi metodi, elencati nel seguito.
 1. Cascade Shadows: HDRP sfrutta un algoritmo di suddivisioni in cascata per controllare la qualità delle ombre generate da una luce direzionale, basandosi sulla distanza dalla camera.
 2. Contact Shadows: Viene applicato un algoritmo all'interno del depth buffer, in modo tale da catturare un numero superiore di dettagli che gli algoritmi normali non sono in grado di catturare.
 3. Micro Shadows: Vengono usate le Normal Map e le Ambient Occlusion Map per simulare le ombre che un materiale avrebbe se fosse una mesh.

A partire dalla versione 2019.3 di Unity, la pipeline è stata estesa anche alle applicazioni in realtà virtuale, motivo per cui è stata integrata in questo progetto di tesi [47]. Un esempio di rendering realizzato con HDRP è visibile in Fig. 3.5.

3.2.3 Shader graph

Tra le tante features interessanti messe a disposizione dalla SRP va sicuramente citato per l'apporto che ha dato al lavoro di tesi, lo shader graph. Lo shader graph è uno strumento che permette di realizzare facilmente uno shader, con un classico approccio basato su nodi. Lo shader graph consiste infatti in una rete di nodi interconnessi tra di loro, come mostrato in Fig. 3.6. Ogni volta che si collega un nodo si ha la possibilità di visualizzare l'anteprima del risultato sia sul nodo stesso, che le modifiche che l'introduzione di quel nodo avrà sul risultato finale. Questo ha permesso di sviluppare vari

shader senza dover ricorrere all'utilizzo di linguaggi di programmazione specifici come l'HLSL (High Level Shading Language).

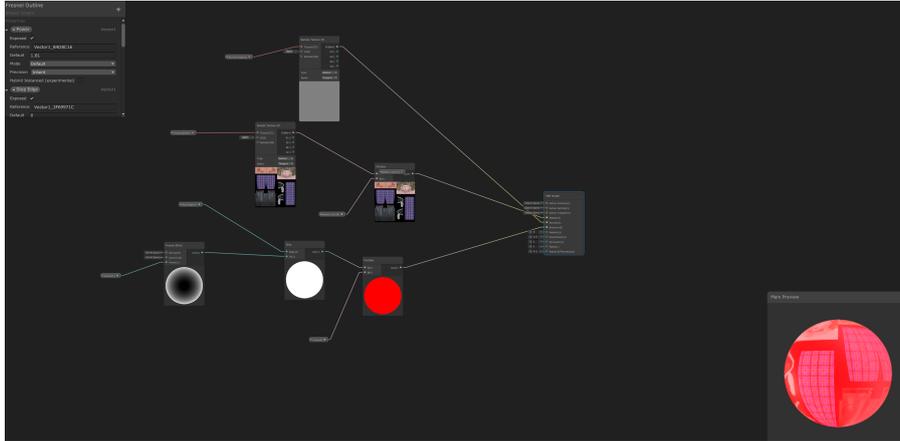


Fig. 3.6. Esempio di shader realizzato con shader graph.

3.3 Samsung Odyssey

Una volta definito il software su cui andare a sviluppare l'esperienza immersiva e le tecnologie utilizzate, bisogna introdurre il dispositivo utilizzato per immergere l'utente nella simulazione. In questo caso la scelta è ricaduta sul sistema HMD Odyssey, progettato da Samsung. Si tratta di Head Mounted Display (HMD) dotato di un display AMOLED, con risoluzione 1440x1600 per occhio. Il display è aggiornato ad una frequenza di 90 Hz ed ha un angolo di visualizzazione orizzontale pari a 110 gradi. A tutto ciò si aggiungono delle cuffie incorporate nell'HMD, che garantiscono un audio immersivo grazie alla spazializzazione in 3D. L'HMD è visibile in Fig. 3.7.



Fig. 3.7. Samsung HMD Odyssey [14]

3.4 MSI VR One Backpack PC

Per quanto riguarda il sistema su cui far operare la simulazione, si è deciso di utilizzare il VR One Backpack PC. Si tratta di un notebook prodotto da MSI, dotato di processore Intel Core I7, scheda grafica GeForce GTX 1070 e 16 GB di RAM. Il sistema è dotato di due batterie ricaricabili che garantiscono un'autonomia complessiva di un'ora e mezza ed ha un peso pari a 3.5 kg. Grazie a queste sue caratteristiche e alla possibilità di installare delle cinghie per poterlo mettere sulle spalle, permette di usare applicazioni in realtà virtuale spostandosi all'interno dell'ambiente virtuale senza l'utilizzo di Controller, ma muovendosi all'interno dell'ambiente reale. Il dispositivo è visibile in Fig. 3.8. Questo sistema è stato fondamentale per l'implementazione del meccanismo detto "Real walk", descritto successivamente.



Fig. 3.8. MSI VR One BackPack PC [15]

Capitolo 4

Realizzazione

In questo capitolo si andranno a studiare le varie fasi della realizzazione dello strumento per la valutazione dell'esperienza utente in uno scenario di interazione tra veicoli autonomi e pedoni oggetto di questa tesi. Questa realizzazione può essere suddivisa in quattro fasi: la configurazione dello scenario, la configurazione dei diversi asset utilizzati, la configurazione dei veicoli autonomi ed infine la realizzazione delle diverse interfacce.

4.1 Configurazione dello scenario

La configurazione dello scenario ha superato diverse fasi necessarie ad ottenere una simulazione che fosse la più immersiva e realistica possibile, nonostante alcune limitazioni degli asset di partenza.

4.1.1 Importazione AirSim

Il simulatore AirSim mette a disposizione due differenti scenari di prova, uno configurato per droni, il secondo, di maggiore interesse, configurato per veicoli. AirSim già di suo mette a disposizione un controller per veicoli e un sistema per registrare i dati legati al movimento del veicolo. Tuttavia, per lo scopo di questa tesi questi elementi sono stati disattivati, per non pesare eccessivamente sulle prestazioni dello scenario. È possibile in ogni caso riattivarle, nel caso in cui sia necessario installare dei reali meccanismi di guida autonoma sui veicoli dello scenario e, in questo modo, ottenere dati dai suddetti algoritmi.

4.2 Ottimizzazione

Una volta configurato l'intero scenario e avviata la scena, senza fare alcun intervento dal punto di vista grafico, ci si è resi conto che la simulazione non aveva un framerate accettabile per la realtà virtuale. Infatti, il rendering stereoscopico richiede un framerate stabile di 90 fps per evitare fenomeni di motion sickness nei tester che si ritrovano immersi nella simulazione. Per far fronte a queste problematiche è stato necessario operare un lavoro di ottimizzazione della logica dello scenario, in modo tale da migliorare le prestazioni. Ciò è stato fatto seguendo due direzioni differenti: da un lato la conversione della logica secondo un paradigma DOO (Data Oriented Design), dall'altro attraverso l'ottimizzazione grafica dello scenario.

4.2.1 Conversione a ECS

Si è deciso di seguire la strada dell'ECS ibrido per ottimizzare lo scenario dal punto di vista della logica. Provare ad implementare l'ECS puro, in una scena così fortemente legata ad asset esterni per il suo funzionamento, sarebbe stato controproducente. Per operare con ECS ibrido, Unity mette a disposizione lo script `Convert To Entity`. Questo script viene assegnato al `GameObject` che si vuole convertire in `Entity` e permette di selezionare tra due diverse possibilità:

- `Convert and Inject GameObject`: converte il `GameObject`, creando una `entity` ed assegnandole tutti i component del `GameObject`. In modo iterativo la stessa operazione viene applicata ai figli del `GameObject` a cui è stato applicato lo script. Il `GameObject` non viene distrutto ma viene mantenuto nella scena come copia della `entity`. A questo proposito è compito del programmatore sincronizzare `GameObject` ed `Entity` per fare in modo che coincidano sempre con lo stesso `GameObject`.
- `Convert and Destroy`: realizza le medesime operazioni del caso precedente ad eccezione della distruzione del `GameObject`: il `GameObject` viene infatti distrutto nella scena e rimane solo la `Entity` che dovrà essere controllata con appositi `System`.

La prima opzione è quella che è stata seguita in questo caso. A questo punto, con queste ottimizzazioni e una volta attivato il `Burst Compiler`, si è raggiunto l'obiettivo dei 90 fps. Tuttavia i 90 fps raggiunti non erano pienamente stabili: per migliorare ulteriormente le prestazioni è stato dunque necessario effettuare delle ottimizzazioni anche dal punto di vista grafico.

4.2.2 Configurazione HDRP

Il passo precedente all’ottimizzazione grafica è stato il passaggio alla HDRP. Come detto, dalla versione 2019.3 di Unity questa pipeline può essere utilizzata anche per applicazioni in realtà virtuale. Di conseguenza si è deciso di utilizzare questa versione di Unity per portare avanti il lavoro. Il passaggio a questa pipeline di lavoro è quasi completamente automatizzato da Unity, bisogna solo convertire i materiali del progetto nei nuovi materiali messi a disposizione da HDRP. Questo si può fare sostituendo le texture nei singoli materiali ed effettuando aggiustamenti in caso di problemi. In particolare uno tra i problemi più complessi che si sono presentati è stato proprio il fatto che alcuni shader che operavano correttamente nella pipeline di base, in HDRP non venivano più renderizzati correttamente. Questi shader sono stati ricostruiti con l’aiuto dello shader graph. Uno tra gli esempi più semplici è quello legato all’interfaccia “Smart road”, che verrà descritta successivamente, la cui logica di accensione e spegnimento degli elementi dell’interfaccia è stata realizzata con l’ausilio dello shader graph come visibile in Fig. 4.1

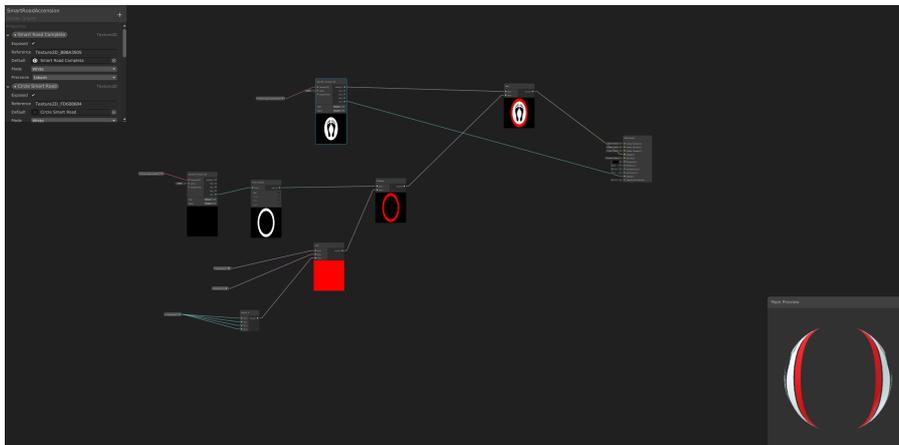


Fig. 4.1. Shader realizzato con shader graph.

A questo punto sono state configurate le impostazioni della pipeline. Questo può essere fatto andando a modificare direttamente il file .asset della pipeline, che contiene tutte queste impostazioni. Innanzitutto è stata modificata la distanza a cui vengono visualizzati i LOD (Level Of Details). Il concetto che sta alla base dei LOD è quello di racchiudere all’interno di uno stesso GameObject, più mesh con un numero diverso di poligoni, che, a

runtime, vengono renderizzate a seconda della distanza del Player dall'oggetto stesso: se il Player è vicino all'oggetto, verrà renderizzata la mesh con un numero maggiore di poligoni e quindi più dettagliata, se il Player è lontano, verrà renderizzata la mesh con un numero inferiore di poligoni o non verrà renderizzato proprio nulla. Questo impatta enormemente sulle prestazioni e HDRP permette di impostare un moltiplicatore per il LOD degli oggetti di tutta la scena, in modo tale da modificare queste distanze in modo generale, senza andare a modificare i singoli GameObject.

E' stata poi attivata la risoluzione dinamica che, come descritto precedentemente, consiste in una tecnica che riduce la risoluzione dei render target dinamicamente per ridurre il carico di lavoro sulla GPU. Non essendo possibile con il setup attuale attivarla via hardware, è stata applicata via software.

Una volta configurate queste prime impostazioni, si è passati a definire le impostazioni della scena dal punto di vista grafico. HDRP permette di definire un layer di post-processing a cui verrà associato il rendering della camera, su cui verranno applicati gli effetti di post-processing. Su questo layer è stato indicato che le ombre venissero calcolate con la tecnica "micro shadows", già citata in precedenza e che permette di calcolare l'effetto delle ombre in modo più realistico. E' stato poi impostato il cielo, che in questo caso è della tipologia High Definition Render Image (HDRI), ovvero un tipo di cielo che viene generato a partire da una texture cubemap. Infine è stata abilitata la nebbia per dare un effetto maggiore di realismo alla scena ed è stata fatta una color correction per far risaltare maggiormente i colori dello scenario.

4.2.3 Ottimizzazioni grafiche

Nella fase di configurazione della pipeline sono già state citate alcune ottimizzazioni effettuate sullo scenario, quali le modifiche ai LOD e la risoluzione dinamica, che hanno impattato positivamente sulle prestazioni. Tuttavia è stato necessario effettuare ulteriori ottimizzazioni per semplificare la scena. Innanzitutto sono stati eliminati tutti i Mesh Collider che, di base, nello scenario Windridge City, erano presenti su tutti gli oggetti. I Mesh Collider sono dei Collider costruiti per seguire la mesh dell'oggetto e questo tende a rendere più complessi i calcoli fisici fatti durante la simulazione. Sono stati di conseguenza sostituiti da Collider di forma più semplice, come Collider cubici per i palazzi.

Per ogni materiale ripetuto più volte all'interno della scena, come quello associato ai veicoli o ai pedoni, è stato attivato il GPU Instancing. Si tratta di una tecnica che viene utilizzata nel momento in cui si ha la necessità di renderizzare più copie di una stessa mesh in una volta sola. Permette di renderizzare mesh identiche con una singola “draw call”, l’istruzione che viene inviata alle API grafiche per renderizzare un GameObject, ma ciascuna istanza può avere parametri diversi (per esempio il colore o le dimensioni) per ridurre la ripetitività dello scenario. Un’altra tecnica che è stata sfruttata è lo Static Batching. Gli oggetti non dinamici, che non si spostano nello scenario, possono essere indicati attraverso un flag come oggetti statici. Questi, automaticamente, se attivato lo Static Batching, vengono combinati tra di loro e renderizzati a gruppi con singole draw call. Questo va ad impattare sulla memoria del sistema su cui la simulazione è attiva, ma riduce il carico sulla GPU.

4.3 Configurazione veicoli

Una volta configurato lo scenario e la simulazione nella sua interezza, si è poi proceduti a definire il comportamento realistico dei veicoli autonomi che sarebbero poi stati utilizzati nella realizzazione dell’esperienza virtuale. Per raggiungere questo obiettivo sono stati introdotti due concetti: le strategie di frenata dei veicoli e, collegato a questo, un sistema di controllo basato su un controllore Proporzionale-Integrativo-Derivativo (PID).

4.3.1 Configurazione curve di decelerazione

Per lo studio in questione si è deciso di approssimare la frenata del veicolo con un moto a decelerazione costante. In particolare è stato definito il comportamento di frenata standard del veicolo, caratterizzato da una decelerazione costante a 3 m/s^2 ed il comportamento in corrispondenza di una frenata di emergenza, caratterizzato da una decelerazione di 6 m/s^2 . Non è possibile avere decelerazioni di entità superiore a quest’ultima. Questi valori sono stati dedotti da precedenti studi sul comportamento di veicoli non autonomi in fase di decelerazione, in relazione ai tempi di reazione dei guidatori umani [48]. Sulla base di queste considerazioni sono state definite delle curve velocità-distanza come quelle mostrate in Fig. 4.2.

Queste curve sono state realizzate su Unity con l’ausilio delle Animation

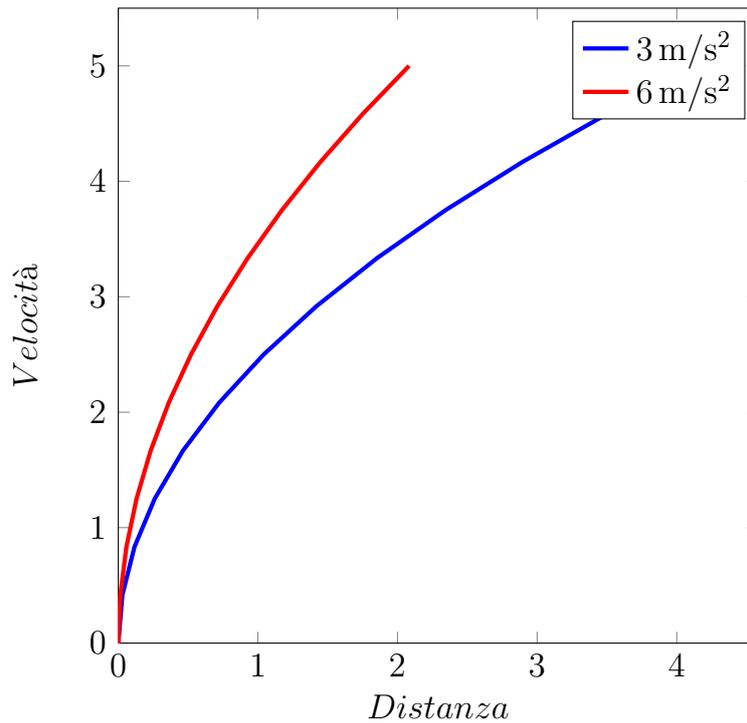


Fig. 4.2. Curve velocità-distanza.

Curves. Si tratta di uno strumento che, normalmente, viene utilizzato per tracciare nel tempo dei Keyframe, per la realizzazione di animazioni ad hoc. In questo caso tuttavia sono servite per avere dei riferimenti in grado di definire il comportamento del veicolo autonomo. Una volta definite le curve di decelerazione, è stato necessario specificare le seguenti strategie di frenata.

- Early follower: nel momento in cui il veicolo autonomo individua il pedone interessato ad attraversare, esso comincia a frenare con una decelerazione costante, calcolata sulla base della velocità attuale del veicolo autonomo. Con questa strategia il veicolo anticipa la curva di decelerazione standard che dovrebbe seguire.
- Strict follower: il veicolo autonomo, nel momento in cui individua il pedone interessato ad attraversare, non comincia a decelerare nell'immediato, ma mantiene una velocità costante finché non intercetta una delle due curve di decelerazione standard. Una volta intercettata la curva, decelera seguendo la velocità specificata dalla curva.

4.3.2 Controllore PID

Una volta definite le modalità di decelerazione del veicolo, è stato necessario progettare un controllore PID per fare in modo che il veicolo seguisse concretamente le curve. Il controllore PID è un sistema controllato in retroazione negativa ampiamente usato in ambito industriale. L'idea che sta alla base del controllore PID è quella di leggere l'output proveniente da un sensore e confrontare questo valore con un valore di riferimento. Viene calcolata la differenza tra questi due valori e il risultato viene utilizzato per calcolare l'output del sistema. L'output viene ottenuto calcolando la risposta proporzionale, integrativa e derivativa del sistema e sommando queste tre componenti.

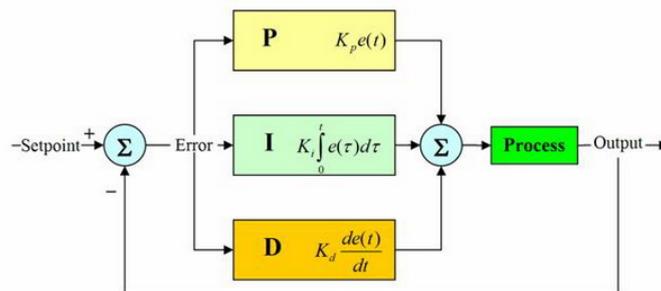


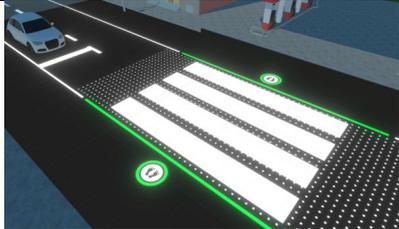
Fig. 4.3. Schema a blocchi del controllore PID.

Lo schema a blocchi del controllore PID è riportato in Fig. 4.3. L'implementazione di questo controllore ha permesso di gestire le variazioni di velocità del veicolo, in modo tale che fossero conformi alle strategie di frenata definite.

4.4 Selezione delle interfacce

Per lo scopo del lavoro di tesi si è deciso di tenere in considerazione quattro diverse interfacce tra quelle menzionate nello stato dell'arte, in particolare quelle riassunte in Tabella 4.1.

Tabella 4.1: Interfacce

Interfaccia	Lavoro	Descrizione
	<p>[8, 35, 36]</p>	<p>Pannello LED montato nella parte frontale del veicolo che mostra una linea retta durante la normale marcia del veicolo. Questa retta nel momento in cui il veicolo autonomo prende in carico un pedone si piega e si trasforma in un sorriso.</p>
	<p>[8, 10, 42, 49]</p>	<p>Proiezione sul terreno di strisce pedonali con animazioni di tipo diverso per far comprendere al pedone lo stato interno del veicolo autonomo.</p>
	<p>[8, 11]</p>	<p>Interfaccia associata direttamente al manto stradale, che indica all'utente i momenti in cui è sicuro attraversare così come quelli in cui è pericoloso.</p>
	<p>[12]</p>	<p>Questa interfaccia mostra le zone in cui è sicuro per il pedone attraversare, usando delle gradazioni di colore dal rosso al verde. Viene anche mostrato lo spazio di frenata massimo del veicolo, identificato con una freccia, con un rettangolo alla sua estremità.</p>

Verranno di seguito specificati i motivi per cui si è deciso di usare queste interfacce e, nella sezione successiva, come sono state realizzate nella pratica.

4.4.1 Smile e Projection

Dallo studio dello stato dell’arte e da lavori che si sono occupati di effettuare confronti tra diverse interfacce per veicoli autonomi [8], è evidente come sia possibile fare una classificazione dei diversi concept (ed eventuali realizzazioni) basata sulla loro complessità. Si possono infatti distinguere le seguenti tipologie di concept:

- concept che forniscono un unico indizio;
- concept che forniscono informazioni dettagliate ed un feedback costante;
- concept ideati per diverse situazioni, che usano diverse modalità di comunicazione;
- concept che simulano il comportamento umano per creare un’interazione il più possibile naturale.

Questa classificazione è servita per individuare nello stato dell’arte le migliori interfacce tra quelle localizzate sul veicolo autonomo. In particolare da lavori come [8] è stato dimostrato che l’interfaccia che da questo momento in poi verrà chiamata “Smile”, mostrata in Fig. 4.4, è stata particolarmente apprezzata tra i diversi concept, per la sua semplicità, per la sua non ambiguità e per la sua intuitività. Per questo motivo è stato deciso di considerarla, in questo lavoro di tesi, come rappresentante delle interfacce limitate ad indizi visivi.

Un’altra interfaccia che è stata presa in considerazione, sempre facendo riferimento allo stesso lavoro citato in precedenza, come rappresentante dei concept visivi complessi con feedback costante è quella che da questo momento in avanti verrà chiamata col termine “Projection”, mostrata in Fig. 4.5. In particolare questa interfaccia è stata particolarmente apprezzata per l’efficacia dell’animazione e per l’intuitività delle strisce pedonali [8].

Entrambe le interfacce precedentemente citate sono state implementate così come indicate in [8], ad eccezione dell’interfaccia “Projection”, per la quale si è deciso di eliminare l’informazione sonora che recitava “Please, go ahead”,

una volta che il veicolo fosse giunto ad arrestarsi completamente, per concentrarsi maggiormente sull'aspetto visivo dell'interfaccia ed eliminare qualsiasi altro mezzo di comunicazione con il pedone.

4.4.2 Smart road

La terza interfaccia che è stata presa in considerazione è quella precedentemente definita col termine "Smart road". Ovvero quell'interfaccia in cui il sistema non è montato sul veicolo, ma, al contrario, è inserito nell'infrastruttura stradale. Questa interfaccia, come già esplicitato nel capitolo sullo stato dell'arte, risulta essere particolarmente apprezzata rispetto ad altre interfacce montate sul veicolo autonomo stesso, in particolare perchè elimina tutte quelle limitazioni legate alla visibilità dell'interfaccia a grandi distanze. Per omologare il funzionamento della "Smart road" a quello delle altre interfacce che sono state implementate in questo lavoro di tesi, si è deciso di realizzare una tipologia di "Smart road" nella quale è il veicolo a controllare l'infrastruttura stradale e a rilevare il pedone: la "Smart road" non ha alcuna possibilità di rilevare i pedoni o di agire autonomamente.

4.4.3 Realtà aumentata

Come già descritto nello stato dell'arte, in [12] ed altri lavori affini, sono stati realizzati una serie di concept per interfacce per veicoli autonomi in realtà aumentata. Concept di questo tipo potrebbero risolvere varie problematiche identificate nelle interfacce più semplici basate su LED, tra cui la limitata scalabilità di queste e i possibili scenari confusionari che si potrebbero originare nel momento in cui il numero di pedoni dovesse aumentare, come succederebbe in uno scenario realistico. Tra i vari concept presentati in [12] quello più completo e più interessante risulta essere quello che nel seguito del documento verrà chiamato "Safe roads", visibile in Fig. 4.7. Questo concept non è stato sperimentato in condizioni reali o simulate, ma è stato dimostrato in ogni caso come per gli utenti renda le intenzioni del veicolo autonomo più facilmente comprensibili e permetta al pedone di prendere più rapidamente una decisione su come comportarsi nell'attraversamento, con un carico cognitivo ridotto. A questo concept di base è stata associata una variante che è stata chiamata col termine "Safe roads extended". Si è deciso di implementare questa variante aggiuntiva in modo tale da poter aggiungere alla semantica base di "Safe roads" una serie di informazioni supplementari.

Nella prossima sezione verrà descritto nel dettaglio come queste interfacce siano state realizzate, in parte modificandole, ai fini della tesi.

4.5 Realizzazione delle interfacce

Prima di trattare nel dettaglio le modalità con cui sono state implementate le specifiche interfacce, è necessario fare riferimento alla “Baseline” che si è deciso di utilizzare in questo lavoro. Tutti i veicoli, indipendentemente da quali interfacce vengano mostrate, viaggiano a velocità pari a 50 km/h. Si è deciso di utilizzare all’interno della “Baseline” e, di conseguenza, per tutte le interfacce, unicamente la strategia di frenata “Early Follower”, già descritta in precedenza. Questo è stato fatto per evitare di introdurre ulteriori variabili all’interno della simulazione e focalizzare l’attenzione dell’utente sull’interfaccia, piuttosto che sulla strategia di frenata. Il comportamento base del veicolo implica che, se questo non fosse in grado di rallentare ad una distanza di sicurezza dal pedone, esso attiva un segnalatore acustico per avvisarlo del pericolo. Una volta definito il comportamento della “Baseline”, comune a tutte le interfacce, si è passati all’implementazione delle stesse, nella quale si è cercato, per quanto possibile, di generalizzare la logica di controllo, in modo tale che questa possa essere facilmente adattata in futuro per testare nuovi concept. Ogni veicolo ha infatti associato uno script chiamato Crossing Managment: questo script si occupa di istanziare i diversi elementi dell’interfaccia. Questo permette di avere degli scenari tra di loro molto simili che si differenziano esclusivamente per la logica. In generale tutte le interfacce operano nello stesso modo: viene generato a runtime un Collider che opera da trigger. Ogni volta che un pedone entra all’interno del suddetto Collider, viene attivata la logica di un altro script chiamato Crossing Trigger, che interviene sul Controller del veicolo, attivando i meccanismi di decelerazione e, allo stesso tempo, attiva il comportamento predefinito dell’interfaccia.

4.5.1 Smile

Per realizzare l’interfaccia Smile si è partiti dalla modellazione di un piano sul software Blender, a cui sono stati aggiunte delle shape keys, ovvero delle deformazioni della mesh, in modo tale che assumesse la forma di un sorriso. Questa mesh è stata poi successivamente importata in Unity. Tutte le volte che una mesh viene importata in Unity, automaticamente vengono importate le shape keys definite in Blender, su Unity chiamate BlendShapes. Queste

vengono controllate da un parametro, modificabile via script e a questo punto tutto ciò che rimane da fare è animare questo parametro per il GameObject corrispondente. Tutte le volte che un pedone entra nel trigger del veicolo autonomo, viene attivata una Coroutine, ovvero una funzione con la capacità di bloccare la propria esecuzione e proseguirla nel frame successivo. Questa Coroutine interpola il parametro della BlendShape del sorriso tra 0 e 100. Quando il pedone esce da questo trigger, la situazione viene riportata alla normalità, con un'altra Coroutine che realizza l'operazione inversa. Questa duplice operazione è ciò che garantisce il funzionamento dell'interfaccia. Il risultato è visibile in Fig. 4.8.



Fig. 4.8. Interfaccia Smile.

4.5.2 Projection

Per quanto riguarda l'interfaccia Projection, la proiezione di base è stata realizzata grazie all'ausilio dello shader graph: usando questo strumento infatti, è stato realizzato uno shader che prende come input due diverse texture, la prima rappresentante delle onde blu in movimento e la seconda delle strisce pedonali. È inoltre dotato di una serie di parametri che permettono di modificare la texture del materiale, facendo un'interpolazione tra le due texture, oltre che di cambiare colore al materiale. Questo shader è stato associato ad un materiale, a sua volta applicato ad un piano, che permette di simulare una proiezione sul terreno. Tutti i parametri dello shader vengono controllati da uno script chiamato Interface Management, che attiva una serie di Coroutine a seconda delle informazioni che si vogliono mostrare al pedone. Nel

momento in cui il pedone entra nel Collider associato all'interfaccia, viene attivata la prima fase, ovvero la conversione delle onde, la proiezione mostrata durante il normale movimento del veicolo autonomo, in strisce pedonali di colore rosso. Nel momento in cui il veicolo conclude la fase di decelerazione, il colore delle strisce viene mutato in verde. Una Coroutine a parte si occupa del movimento di queste strisce, facendole muovere nella direzione verso cui l'utente si deve spostare per attraversare, controllando l'offset della texture.

Alla proiezione sul terreno è associato anche un pannello LED posto frontalmente al veicolo, che si illumina seguendo un pattern a seconda della fase della proiezione e che è stato proposto da Mercedes nel concept denominato f015 in [49]. Questo pannello nella fase di normale operatività del veicolo mantiene tutte le luci accese; quando il pedone attraversa il Collider più esterno, la matrice del pannello comincia a riempirsi dal basso verso l'alto, per poi spegnere le luci dal centro verso i lati. Quando il veicolo si ferma, invece, il pannello comincia ad accendersi da sinistra verso destra nella direzione di movimento del pedone, come mostrato in Fig. 4.9.



Fig. 4.9. Interfaccia Projection.

4.5.3 Smart road

La terza interfaccia che è stata implementata è la “Smart road”. Basandosi sull'implementazione già descritta in precedenza nello stato dell'arte in [8], si è andati per prima cosa a definire le texture e i materiali associati alla “Smart road”. In particolare questa presenta un cerchio per indicare la posizione su

cui il pedone dovrebbe posizionarsi per essere in grado di essere rilevato dal veicolo. Oltre a ciò, sono presenti delle strisce sul manto stradale, i cui materiali sono stati definiti con l'ausilio dello shader graph, in modo tale da modificarne il colore a runtime a seconda delle necessità. Il funzionamento della "Smart road" è regolato dallo script denominato Smart Road Management. Nel momento in cui non vi sono veicoli nei pressi della "Smart road", il comportamento dell'infrastruttura stradale è quello mostrato in Fig. 4.10. L'attraversamento della strada è in questo caso una scelta completamente autonoma da parte del pedone: l'interfaccia stradale non fornisce alcuna indicazione a tal proposito.



Fig. 4.10. Smart road: stato base

Tuttavia, nel momento in cui un veicolo individua un pedone nei pressi della "Smart road", se esso è in grado di decelerare fino a fermarsi completamente, questo modificherà la "Smart road" in modo tale da far comparire delle strisce sull'attraversamento e convertirà in verde le strisce ai lati dell'attraversamento, come mostrato in Fig. 4.11.



Fig. 4.11. Smart road: è sicuro attraversare

Viceversa, nel caso in cui il veicolo non sia in grado di rallentare in tempo e sia pericoloso per l'utente completare l'attraversamento, questa informazione verrà segnalata al pedone facendo diventare le strisce ai lati della "Smart road" di colore rosso, come mostrato in Fig. 4.12



Fig. 4.12. Smart road: è pericoloso attraversare

4.5.4 Realtà aumentata

La realizzazione delle interfacce in realtà aumentata può essere suddivisa in due fasi separate: la realizzazione della freccia e del suo movimento e la gestione dei colori. Per quanto riguarda il corpo della freccia, questo viene gestito con l'ausilio dello script chiamato Arrow Manager. Questo script prende in considerazione la lunghezza della freccia e due GameObject, che rappresentano rispettivamente la base e la punta della freccia. A runtime, sulla base di queste informazioni, lo script sposta i due GameObject citati in precedenza e genera un piano, di dimensioni opportune, che ha come punto di partenza la base della freccia e come punto finale la punta della stessa. Questo piano rappresenta il corpo della freccia. Al corpo della freccia è associato, nell'estremità superiore della stessa, una linea perpendicolare al corpo che segue lo spostamento della punta della freccia. Per quanto riguarda la gestione del movimento, questo viene gestito da uno script a parte denominato Arrow Movement Manager. Si tratta di uno script che, sulla base della variante attiva, definisce la lunghezza della freccia che viene poi mandata come input allo script descritto in precedenza. Nelle normali condizioni di marcia del veicolo, senza che sia stato rilevato alcun pedone, entrambe le varianti si comportano allo stesso modo: la lunghezza della freccia rappresenta

lo spazio massimo di frenata, corrispondente alla curva di decelerazione più confortevole per gli occupanti del veicolo, caratterizzata da una decelerazione di 3 m/s^2 . Il funzionamento standard dell'interfaccia è mostrato in Fig. 4.13. Nel momento in cui viene rilevato un pedone dal veicolo autonomo viene attivata una delle due diverse varianti presenti.



Fig. 4.13. Funzionamento interfaccia in realtà aumentata

Nel caso di “Safe roads”, il movimento della freccia, dopo che è stato rilevato il pedone ed eseguite le procedure di decelerazione come descritto nei capitoli precedenti, è influenzato dalla velocità del veicolo e dalla curva di decelerazione seguita dallo stesso. In particolare, dato che il veicolo segue la strategia di frenata “Early Follower”, questo, una volta individuato il pedone, genererà una curva di decelerazione calcolata in quell'istante, ad es. una curva con decelerazione a 4.5 m/s^2 . Da quel momento in avanti la lunghezza della freccia verrà calcolata sulla base della velocità del veicolo, prendendo come riferimento la curva standard, tra quelle definite in precedenza, superiore a quella generata. Nel caso dell'esempio citato, la freccia seguirà la curva con decelerazione a 6 m/s^2 . Il funzionamento dell'interfaccia è visibile in Fig. 4.14.

Nel caso della modalità di funzionamento “Safe roads extended” la freccia gialla continua a comportarsi come la freccia descritta in precedenza ma, in aggiunta a questa, sul corpo della freccia è presente un taglio rosso. La posizione del taglio sul corpo della freccia, dipende dalla velocità del veicolo e indica il punto in cui il veicolo si fermerà se, in quell'istante, attuasse una frenata di emergenza con una decelerazione pari a 6 m/s^2 . Di conseguenza, lo spazio tra la base della freccia e il taglio rosso, rappresenta lo spazio minimo



Fig. 4.14. Prima modalità di funzionamento

di frenata del veicolo. In aggiunta a questo, una volta rilevato il pedone, verrà generata una terza freccia di colore blu, che indicherà il punto di frenata esatto calcolato dal veicolo come mostrato in Fig. 4.15.



Fig. 4.15. Seconda modalità di funzionamento

Per quanto riguarda la gestione dei colori, questa è stata realizzata andando a generare a runtime una mesh di forma rettangolare. Il materiale di questa mesh viene modificato dinamicamente sulla base di ciò che è indicato in una griglia di valori interi. Infatti, a ciascuna cella di questa griglia, corrisponde una porzione della mesh generata a runtime. I valori di questa griglia sono compresi tra 0 e 100: al valore 0 corrisponde il colore verde, al valore 100 corrisponde il colore rosso. Tutte le volte che uno dei valori della suddetta griglia viene modificato, questa modifica si ripercuote sui colori visualizzati, andando a far corrispondere il colore rosso nelle celle della griglia corrispondenti a 100, e il verde per quelle con valore 0, con tutte le sfumature intermedie

tra 0 e 100. L'aggiornamento dei valori sulla griglia avviene in questo modo: ogni volta che la lunghezza della freccia viene modificata dallo script Arrow Manager, citato in precedenza, viene calcolato il punto medio della freccia. Questo punto medio corrisponderà ad una cella della griglia e il valore di tutte le celle nei pressi della cella selezionata, verrà incrementato di un certo offset e a questo incremento corrisponderà un cambiamento nei colori della griglia come descritto in precedenza. In questo modo la griglia viene modificata dinamicamente sulla base della lunghezza della freccia. Semanticamente le zone verdi indicano quelle sezioni della strada in cui è sicuro per il pedone attraversare, mentre le zone rosse quelle in cui risulta, al contrario pericoloso. Il risultato è visibile in Fig. 4.16.

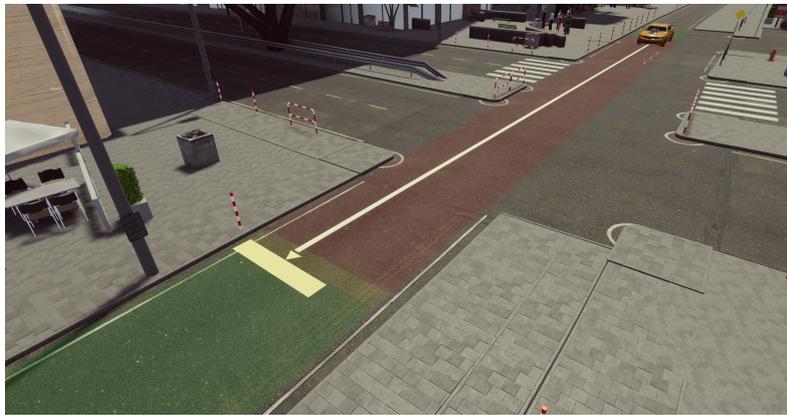


Fig. 4.16. Visualizzazione dei colori

Questo conclude l'esposizione degli elementi che sono stati implementati in questo lavoro di tesi. Il prossimo capitolo definirà le modalità con cui è stata strutturata la simulazione per uno studio efficace dell'esperienza utente.

Capitolo 5

Valutazione dell'esperienza utente

Una volta strutturato l'ambiente di simulazione e la logica dei veicoli autonomi e delle relative interfacce, è stato necessario costruire uno scenario per poter studiare l'esperienza degli utenti attraverso la raccolta di dati quantitativi e qualitativi. Facendo riferimento ai precedenti studi effettuati in questo ambito, sono emerse una serie di criticità sulle modalità di analisi dell'esperienza utente. Questo capitolo si focalizzerà su queste criticità e sulle modalità in cui sono state affrontate nella costruzione della simulazione.

5.1 Preparazione alla simulazione

Un primo aspetto relativo all'esperienza riguarda il fatto che è necessario che il pedone familiarizzi con le singole interfacce prima che l'esperimento vero e proprio cominci. Questo immaginando che, se in un prossimo futuro una delle interfacce descritte in precedenza dovesse venire adottata dalle case produttrici di veicoli autonomi, questa sarebbe standardizzata e quindi nota a tutti gli utenti della strada. Di conseguenza, sono stati registrati una serie di video nei quali l'utente può vedere un personaggio virtuale nel corso di un attraversamento. Questi video permettono di vedere almeno una volta tutti gli stati delle diverse interfacce implementate, con una spiegazione in sottofondo che consente di comprenderne la semantica.

L'utente visiona un video per poi essere immerso nella simulazione e sperimentare l'interfaccia visualizzata nel video. Il task principale che l'utente si trova a dover affrontare nel corso dell'esperienza è quello di attraversare nel

momento in cui si sente maggiormente sicuro e di completare un certo numero di attraversamenti. In particolare, l'esperienza viene vissuta dall'utente con un meccanismo detto "real walk". Questo termine implica che l'utente avrà la possibilità di spostarsi all'interno del mondo virtuale non con l'ausilio di un Controller, bensì camminando all'interno dell'ambiente reale.

5.2 Attraversamento

Una prima criticità che è stata affrontata è stata quella relativa a come strutturare l'attraversamento del pedone. Innanzitutto, è necessario un attraversamento non regolato, privo di indicazioni stradali sul cemento o anche di un semaforo. Infatti, la presenza di questi elementi metterebbe in secondo piano l'interfaccia, riducendone l'efficacia e invalidando la valutazione della stessa. Un altro elemento da tenere in considerazione riguarda la tipologia di strada su cui il pedone deve completare l'attraversamento: si è deciso, a tal proposito, di utilizzare una strada a senso unico dotata un'unica corsia. Questa scelta è stata effettuata per tentare di focalizzare l'attenzione dell'utente sia sulla semantica dell'interfaccia che su altri aspetti dell'esperienza che verranno descritti nella sezione successiva, piuttosto che creare situazioni confusionarie con molteplici veicoli provenienti da diverse corsie che, potenzialmente, rischierebbero di limitare la validità dell'esperienza.

5.3 Treno di veicoli

In diversi lavori citati nello stato dell'arte è evidente come sia fondamentale, per ottenere risultati concreti da un'esperienza di questo tipo, creare delle situazioni di traffico che siano le più realistiche possibili. Per questo motivo si è deciso di ragionare in termini di "treno di veicoli", ovvero di una successione continua di veicoli a distanze diverse. A tal proposito, è stato necessario sviluppare un generatore automatico di veicoli. I veicoli vengono generati a distanze predefinite ed un aspetto fondamentale è stata proprio la scelta delle suddette distanze. Infatti, ci si è resi conto di come, variando la distanza a cui il pedone interagisce col veicolo autonomo e con la specifica interfaccia, l'esperienza fosse completamente diversa. Di conseguenza, in analogia con altri lavori che hanno ragionato in questi termini [37, 50, 51], si è deciso di utilizzare tre diverse distanze tra veicoli: veicoli distanziati da 45 metri, 60 metri e 100 metri. Si è deciso di utilizzare un treno di veicoli con una successione di distanze pseudo-casuale, all'interno della quale le distanze

risultano distribuite uniformemente, in modo tale che l'utente non riconosca alcun pattern e si adatti alle diverse situazioni che si presentano nel corso della simulazione. Il treno di veicoli è visibile in Fig.5.1



Fig. 5.1. Visualizzazione del treno di veicoli

Sempre basandosi sulle considerazioni fatte in altri lavori, è stato necessario aggiungere un ulteriore elemento di realismo nella simulazione, rappresentato dai cosiddetti veicoli “not yielding”. Si tratta di veicoli caratterizzati da una sorta di malfunzionamento del sistema di guida, per cui non prendono in carico il pedone e non danno precedenza, ma proseguono senza rallentare. Un altro aspetto fondamentale della simulazione, che si è tenuto in considerazione, è quello che riguarda la gestione delle auto in coda. Si tratta di un elemento che in altri lavori è stato tenuto poco in considerazione, a causa della natura dei lavori stessi. Tuttavia, così come auto a distanze diverse generano situazioni potenzialmente diverse in base all'interfaccia, allo stesso modo il comportamento di un pedone nel completare un attraversamento spostandosi tra veicoli incolonnati cambia enormemente in base all'interfaccia. Per tale motivo, si è deciso di mantenere la possibilità che le auto possano generare delle code nel corso della simulazione. Nel momento in cui si presenta una situazione di questo tipo, la generazione del treno di veicolo viene bloccata. Una volta che l'utente completa un attraversamento e i veicoli incolonnati riprendono la loro marcia, allo stesso modo riprende la generazione del treno di veicoli. Il primo veicolo viene generato due volte: la prima come veicolo “not yielding”, la seconda volta come stabilito nel comportamento base. Questo è stato fatto per evitare di bloccare totalmente il treno di veicoli, ma mantenere allo stesso tempo la possibilità che si formino delle code.

5.4 Misure

Per valutare l'esperienza utente è necessario raccogliere dei dati legati al comportamento degli utenti. In un'esperienza di questo tipo, lavori precedenti hanno dimostrato quanto sia importante raccogliere misure qualitative, sotto forma di questionari o interviste semi strutturate, rispetto alle misure quantitative. Questo perchè, innanzitutto, sono poche le misure quantitative che possono essere raccolte da un'esperienza di questo tipo e, come verrà spiegato nella prossima sezione, sono tutte fundamentalmente degli intervalli temporali; inoltre, trattandosi di uno studio sulle interfacce, è fondamentale capire se gli utenti sono stati in grado di comprenderne la semantica e di sfruttarla in modo appropriato. Le misure quantitative sono però fondamentali per validare quelle qualitative. Nei prossimi paragrafi verranno esplicitate le misure che si è deciso di raccogliere nel corso dell'esperienza.

5.4.1 Misure quantitative

È stato già precedentemente specificato come il task principale per l'utente, all'interno della simulazione, sia quello di attraversare la strada nel momento in cui si sente sicuro nel farlo. Per definire il momento in cui la simulazione si conclude, è stato innanzitutto necessario stabilire il numero massimo di veicoli che possono essere generati, pari a 300 veicoli. Oltre a questo limite superiore per la conclusione della simulazione, è stato definito anche un limite inferiore, rappresentato dal numero minimo di attraversamenti che l'utente deve portare a termine. Questo numero minimo di attraversamenti è pari a 15 attraversamenti e, di questi 15, è necessario che siano fatti 3 attraversamenti per ognuna delle singole distanze definite in precedenza. Nel caso in cui quest'ultima condizione non venisse soddisfatta, la simulazione prosegue fino al suo compimento. Questi valori sono stati studiati in modo tale da limitare il tempo di permanenza nella simulazione da parte dell'utente, ma allo stesso tempo di avere la possibilità di raccogliere un numero sufficiente di dati. Una prima misura fondamentale è di conseguenza il numero di attraversamenti effettuati dall'utente ma, soprattutto, le relative distanze tra veicoli a cui questi attraversamenti avvengono. Non vengono tenuti in considerazione, nel calcolo complessivo del numero di attraversamenti, quelli effettuati con veicoli incolonnati. Oltre al numero di attraversamenti ed, eventualmente, al numero di collisioni con i veicoli, si è deciso di tenere in considerazione gli intervalli temporali. In particolare sono stati memorizzati alcuni timestamp che verranno elencati nel seguito.

- Inizio della simulazione.
- Presa in carico del pedone da parte del veicolo: questo istante temporale può essere considerato, nel caso l'utente decida di attraversare, come l'istante di inizio attraversamento da parte del pedone. Questa misura viene memorizzata sia che il veicolo sia in grado di fermarsi prima del pedone, sia che sia impossibile per esso bloccare la corsa in tempo.
- Completamento di un attraversamento: da altri lavori si evince come la differenza tra questo tempo e il tempo di inizio dell'attraversamento possa essere utilizzata per misurare eventuali incertezze da parte del pedone in fase di attraversamento.
- Collisione con un veicolo: è stato sperimentato da altri lavori come con esperimenti in realtà virtuale sia abbastanza difficile che il pedone fallisca completamente un attraversamento e venga colpito da un veicolo, tuttavia può essere una misura aggiuntiva utile per studiare eventuali fallimenti di questo tipo.

A queste informazioni è necessario aggiungere riprese video del comportamento esterno dell'utente. Infatti, come già specificato in precedenza, essendo attivo il meccanismo del “real walk”, può essere utile riprendere l'utente durante l'esperienza per individuare eventuali momenti di indecisione e, di conseguenza, completare le informazioni ricavate dall'analisi dei timestamp.

5.4.2 Misure qualitative

Per quanto riguarda le misure qualitative, è stato realizzato un questionario in parte ispirato ad altri proposti in lavori precedenti. Esso può essere suddiviso in diverse parti, che dovranno essere compilate dagli utenti nel corso delle varie fasi sperimentali. Una prima parte consiste in un pre-questionario, necessario per ricavare informazioni di tipo demografico dagli utenti e per stimare le opinioni degli stessi in relazione al mondo dei veicoli autonomi. Successivamente viene proposto un primo Simulation Sickness Questionnaire (SSQ) [52] per valutare lo stato di salute degli utenti prima che si immergano nella simulazione.

Una volta fatto visionare agli utenti il primo video di spiegazione dell'interfaccia, questi devono rispondere ad una serie di domande a risposta aperta. Queste sono necessarie per verificare la comprensione da parte dell'utente dell'interfaccia, prima di cominciare la simulazione vera e propria. Una volta completata una prima esperienza con l'interfaccia spiegata, agli utenti viene

richiesto di compilare una parte di questionario che ha come obiettivo quello di valutare diversi aspetti dell'interfaccia tra cui la fiducia nei confronti della stessa, la sua intuitività, il carico cognitivo e la sicurezza percepita. Questi singoli aspetti sono stati valutati attraverso una serie di questionari standard. Infatti, per quanto riguarda la fiducia dell'utente nei confronti del sistema, questa viene valutata attraverso il questionario denominato "Trust scale"[53]. La valutazione dell'usabilità dell'interfaccia viene effettuata con l'ausilio del System Usability Scale (SUS) [54]. Il carico cognitivo viene valutato con l'ausilio del questionario NasaTLX [55]. Infine, l'ultimo questionario standard impiegato è lo Short User Experience Questionnaire (UEQ-S) [56], tramite il quale si ottiene una valutazione generica dell'esperienza utente. Le rimanenti domande presenti in questa sezione del questionario non sono state derivate da questionari standard, ma sono state inserite per valutare diversi aspetti della simulazione. Infatti, per valutare la sicurezza percepita nei confronti dell'interfaccia sono state inserite una serie di affermazioni per le quali l'utente deve esprimere se sia d'accordo o meno, quali ad esempio "L'interfaccia mi ha fatto sentire sicuro" o "Sentivo il bisogno di aspettare che il veicolo si fermasse prima di cominciare l'attraversamento". In aggiunta a queste, sono state proposte varie domande a risposta aperta tra cui "Quali erano secondo te le distanze tra i veicoli?" o ancora "Secondo te davanti a quale veicolo hai attraversato più spesso? E perchè?", per valutare se l'utente si fosse reso conto delle diverse distanze tra i veicoli all'interno del treno e fosse in grado di fare una stima su di esse. Infine, all'utente viene chiesto di classificare la specifica interfaccia sperimentata rispetto alla "Baseline" sulla base di diverse caratteristiche tra cui sicurezza percepita, familiarità, carico cognitivo. Questa procedura viene ripetuta per ogni singola interfaccia. Una volta conclusa l'intera esperienza, all'utente viene proposta l'ultima parte di questionario. Questa contiene un SSQ finale per valutare eventuali malesseri dovuti alla simulazione. Successivamente l'utente deve rispondere ad una serie di domande riprese dal questionario VRUse [57]. Queste sono necessarie per valutare l'usabilità del sistema in realtà virtuale sulla base delle percezioni dell'utente e del suo atteggiamento. Infine, l'ultima parte del questionario è dedicata ad un confronto realizzato dall'utente sulle singole interfacce sotto forma di classifica. Questa classificazione viene generata prendendo in considerazione le stesse caratteristiche che l'utente ha dovuto confrontare con la "Baseline" nel corso dell'esperienza. Infine, all'utente viene richiesto di classificare le interfacce dalla migliore alla peggiore. Il questionario è riportato in Appendice A.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha permesso innanzitutto di approfondire tematiche relative all'interazione tra pedoni e veicoli autonomi. Il primo passo è stato quello di effettuare uno studio sullo stato dell'arte da cui è risultato particolarmente evidente come si tratti di un argomento variegato e ancora in larga parte inesplorato. A tal proposito, sono state studiate le diverse tipologie di interfacce per veicoli autonomi proposte in lavori affini e, da questa analisi, è emerso come siano già stati realizzati alcuni confronti tra interfacce diverse. Questo ha portato all'idea di realizzare uno scenario in realtà virtuale all'interno del quale è stato implementato il comportamento realistico dei veicoli autonomi e la gestione di alcune interfacce esterne selezionate tra le più promettenti allo stato dell'arte. Infine, sono state proposte le modalità con cui effettuare l'analisi dell'esperienza utente, in modo tale da raccogliere dati di tipo qualitativo e quantitativo che possano aiutare a comprendere il comportamento dell'utente nell'interazione con la specifica interfaccia. Tutto ciò con l'obiettivo di capire quali siano gli aspetti più rilevanti, dal punto di vista percettivo, per l'utente e quali possano essere le tecnologie sulle quali investire in un futuro prossimo. Pur dovendo attendere i risultati di uno studio approfondito, un esempio potrebbe essere quello delle interfacce legate a dispositivi in realtà aumentata. Si tratta di interfacce che, indubbiamente, rappresentano una sfida dal punto di vista tecnologico, ma che possono offrire un canale di comunicazione personale con i pedoni.

6.2 Sviluppi futuri

Come già descritto in precedenza, il tema delle interfacce esterne per veicoli autonomi è una tematica ancora in larga parte inesplorata. Utilizzando gli strumenti realizzati in questo lavoro di tesi possono essere realizzati una serie di esperimenti volti a raccogliere dati qualitativi e quantitativi con i quali studiare l'esperienza utente con le diverse interfacce considerate. Successivamente, potrebbero essere sviluppate una serie di varianti volte a limitare gli svantaggi e massimizzare i vantaggi delle diverse soluzioni. Ad esempio per quanto riguarda l'interfaccia "Smile", potrebbe essere utile aggiungere dei colori, che varino a seconda della situazione. Nel caso in cui il veicolo ad esempio non fosse in grado di bloccare la propria corsa in tempo utile, il colore potrebbe mutare in rosso, come già accade per altre interfacce. Per quanto riguarda l'interfaccia "Smart road", potrebbe essere utile creare delle versioni alternative. Infatti, in questo lavoro di tesi è stata utilizzata una "Smart road" la cui logica è completamente regolata dal veicolo autonomo, che funge da controllore dell'interfaccia. Potrebbe essere il caso di invertire i ruoli, verificando se una variante all'interno della quale è la strada ad operare come controllore e non il veicolo possa portare qualche miglioramento rispetto all'interfaccia per come è stata implementata in questo lavoro.

Un altro aspetto che potrebbe essere interessante considerare in futuri lavori, è quello che riguarda la combinazione di più interfacce. Le interfacce in realtà aumentata possono risolvere varie problematiche rispetto a quelle montate sul veicolo, come già esplicitato in precedenza; tuttavia la limitazione maggiore di queste tecnologie è legata alla necessità di possedere dei visori personali per la realtà aumentata, problema che potrebbe essere risolto combinando tra di loro interfacce montate sul veicolo, con interfacce in realtà aumentata. In questo modo, se i dispositivi in realtà aumentata non fossero in grado di veicolare le informazioni al pedone, questa operazione potrebbe essere realizzata dall'interfaccia posizionata sul veicolo. Discorso analogo può essere fatto per la "Smart road"; infatti, non è ragionevole andare a modificare l'intero manto stradale per installare delle "Smart road", ma combinando la "Smart road" con un'interfaccia montata sul veicolo anche questo problema potrebbe risolversi. Sarebbe interessante di conseguenza andare a studiare queste possibili combinazioni e vedere se queste possano creare confusione o incertezza nel pedone o aumentare il carico cognitivo dell'interfaccia.

Infine, un ultimo aspetto che non è stato tenuto in considerazione in questo lavoro di tesi è legato alle condizioni climatiche. Sono già stati realizzati altri

lavori che si sono concentrati sullo studio di come diverse condizioni atmosferiche influenzino la percezione dell'interfaccia da parte dell'utente. Tuttavia, può essere interessante approfondire studi di questo tipo con interfacce simili a quelle implementate in questo lavoro di tesi.

Appendice A

Questionario di valutazione dell'esperienza utente

A.1 Questionario pre-simulazione

A.1.1 Domande personali

- Età
- Sesso
- Quanto spesso hai utilizzato strumenti per la realtà virtuale immersiva? (HTC-Vive, Oculus Rift etc...) 1 (Mai), 2 (Raramente), 3 (qualche volta), 4 (Spesso), 5 (Ogni giorno)
- Quanto spesso ti capita di attraversare in corrispondenza di incroci non regolati? 1 (Mai), 2 (Raramente), 3 (qualche volta), 4 (Spesso), 5 (Ogni giorno)

A.1.2 Opinione degli utenti nei confronti dei veicoli autonomi

Come valuteresti le seguenti affermazioni? 1 (completamente in disaccordo), 5 (Completamente d'accordo)

- Mi piacerebbe fare un giro su un veicolo autonomo.

- Credo che i veicoli autonomi possano essere un mezzo di trasporto più utile di quelli attualmente esistenti.
- Confido che un veicolo autonomo possa guidare senza alcuna assistenza da parte di un essere umano.
- Non mi sentirei sicuro ad affidare la mia famiglia ad un veicolo autonomo.
- Non userei un veicolo autonomo perchè la tecnologia può fallire.
- Mi fiderei più delle capacità di guida di un veicolo autonomo rispetto alle mie.

A.1.3 Autovalutazione dello stato di salute pre-simulazione

Quanto sei affetto dai seguenti sintomi al momento? 1 (per nulla), 2 (lievemente) 3 (moderatamente) 4 (intensamente)

- Malessere in generale
- Affaticamento
- Mal di testa
- Occhi affaticati
- Difficoltà di messa a fuoco
- Salivazione aumentata
- Sudorazione
- Nausea
- Difficoltà di concentrazione
- Visione sfocata
- Capogiro con occhi aperti
- Capogiro con occhi chiusi
- Vertigini

A.2 Domande post-tutorial

- Puoi descrivere il comportamento del veicolo mentre si avvicinava all'incrocio e dell'interfaccia associata?
- Puoi fare uno schema del comportamento del veicolo, spiegando i tuoi ragionamenti a voce alta?

A.3 Domande post-interfaccia

A.3.1 System Usability Scale

Dai un punteggio alle seguenti affermazioni. 1(Completamente d'accordo) 10 (Completamente in disaccordo)

- Credo che userei il sistema frequentemente.
- Ho trovato il sistema eccessivamente complesso.
- Penso che il sistema sia facile da usare.
- Penso che avrei bisogno dell'aiuto di un "tecnico" per usare il sistema
- Ho trovato le varie funzioni del sistema ben implementate
- Penso ci fossero troppe incongruenze nel sistema
- Penso che la maggior parte delle persone imparerebbe ad usare il sistema velocemente
- Ho trovato il sistema ingombrante/goffo da usare
- Mi sentivo confidente/sicuro nell'usare il sistema
- Ho avuto bisogno di imparare molte cose prima di poter utilizzare il sistema

A.3.2 Trust Scale

Come valuteresti le seguenti affermazioni? 1 (completamente in disaccordo), 5 (Completamente d'accordo)

- Il sistema è ingannevole.

- Il sistema si comporta in modo disonesto.
- Sono insospettito dalle intenzioni, dalle azioni o dall'output del sistema.
- Sono diffidente dal sistema.
- Le azioni del sistema produrranno un risultato dannoso o lesivo.
- Ho fiducia nel sistema.
- Il sistema mi da' un senso di sicurezza.
- Il sistema ha integrità.
- Il sistema è affidabile.
- Posso fidarmi del sistema.
- Ho confidenza con il sistema.
- Ho familiarità con il sistema.

A.3.3 NasaTLX

Dai un punteggio da 0 a 10 ai seguenti elementi. 0 (basso) 10 (alto)

- Sforzo mentale
- Sforzo fisico
- Sforzo temporale
- Performance
- Fatica
- Frustrazione

A.3.4 User Experience Questionnaire

Come valuteresti il sistema? (Scala di valori da 1 a 7)

- Ostruttivo/di supporto
- Complicato/facile
- Inefficiente/efficiente
- Confuso/chiaro
- Noioso/appassionante
- Non interessante/interessante
- Convenzionale/originale
- Usuale/moderno

A.3.5 Sicurezza percepita

Valuta le seguenti affermazioni. 1 (Completamente in disaccordo) 5 (Completamente d'accordo)

- L'interfaccia mi ha fatto sentire sicuro.
- Sentivo il bisogno di aspettare che il veicolo si fermasse prima di cominciare l'attraversamento.
- Ritenevo che attraversare la strada fosse pericoloso.

A.3.6 Valutazione distanza tra veicoli

- Quali erano secondo te le distanze tra i veicoli? (Risposta aperta)
- Secondo te davanti a quale veicolo hai attraversato più spesso? E perché? (Risposta aperta)
- Ti sentivi sicuro ad attraversare ad una grande distanza dal veicolo? 1 (Completamente in disaccordo) 5 (Completamente d'accordo)
- Ti sentivi sicuro ad attraversare a poca distanza dal veicolo? 1 (Completamente in disaccordo) 5 (Completamente d'accordo)

A.3.7 Classificazione interfaccia rispetto alla baseline

Per ognuna delle seguenti caratteristiche valuta se l'interfaccia presenta questa caratteristica in modo maggiore o minore rispetto alla baseline. (1 decisamente in modo minore, 3 indifferente, 5 decisamente in modo maggiore")

- Sicurezza percepita
- Familiarità
- Intuitività
- Carico cognitivo
- Efficienza
- Novità
- Ambiguità
- Facilità d'uso
- Tempo di attesa

A.4 Questionario post-esperienza

A.4.1 Autovalutazione dello stato di salute post-simulazione

Quanto sei affetto dai seguenti sintomi al momento? 1 (per nulla), 2 (lievemente) 3 (moderatamente) 4 (intensamente)

- Malessere in generale
- Affaticamento
- Mal di testa
- Occhi affaticati
- Difficoltà di messa a fuoco
- Salivazione aumentata
- Sudorazione

- Nausea
- Difficoltà di concentrazione
- Visione sfocata
- Capogiro con occhi aperti
- Capogiro con occhi chiusi
- Vertigini

A.4.2 VRUSE

- Senso di immersione e di presenza. 1 (Completamente in disaccordo) 5 (Completamente d'accordo)
 - Le informazioni sensoriali fornite dall'applicazione di Realtà Virtuale, e dalle tecnologie utilizzate, mi hanno fatto sentire di essere immerso nell'ambiente virtuale (di trovarmi in un luogo diverso da quello in cui mi trovo fisicamente).
 - La qualità dell'immagine mostrata dal display ha ridotto il mio senso di immersione e presenza nel mondo virtuale.
 - Sono riuscito a percepire correttamente la scala, le proporzioni e le dimensioni degli ambienti/oggetti nel mondo virtuale.
 - La possibilità di camminare realmente nello spazio virtuale, senza l'utilizzo di controller, mi ha aiutato a sentirmi presente nell'ambiente virtuale.
- In generale valuteresti il tuo senso di immersione e presenza come: per nulla soddisfacente (1), poco soddisfacente (2), mediamente soddisfacente (3), soddisfacente (4), molto soddisfacente (5)?
- Fedeltà della simulazione. 1 (Completamente in disaccordo) 5 (Completamente d'accordo)
 - Ho trovato la simulazione accurata.
 - Gli oggetti nell'ambiente virtuale si sono mossi in modo naturale.
 - La simulazione sembrava bloccarsi o fermarsi a tratti.
 - La percezione che ho avuto degli oggetti virtuali è stata realistica.

- L'esperienza nel mondo virtuale mi è sembrata coerente con quella che avrei potuto vivere nel mondo reale.
- Il movimento dei veicoli autonomi è stato realistico.
- In generale valuteresti la fedeltà della simulazione come: per nulla soddisfacente (1), poco soddisfacente (2), mediamente soddisfacente (3), soddisfacente (4), molto soddisfacente (5)?

A.4.3 Valutazione veicolo autonomo

- Valutazione della simulazione di guida autonoma. 1 (Completamente in disaccordo) 5 (Completamente d'accordo)
 - L'auto autonoma ha mostrato delle adeguate capacità decisionali.
 - L'auto autonoma è andata in difficoltà in caso di cambiamenti inaspettati/repentini.
 - L'auto autonoma ha commesso errori.
 - L'auto autonoma mi è sembrata intelligente.
- Quali errori ha commesso il veicolo autonomo? (Risposta aperta)
- In generale valuteresti la simulazione di guida autonoma come: per nulla soddisfacente (1), poco soddisfacente (2), mediamente soddisfacente (3), soddisfacente (4), molto soddisfacente (5)?
- Credi che il veicolo fosse guidato da un essere umano o da un veicolo autonomo? 1 (Essere umano) 5 (Veicolo autonomo) Perché?
- Credi che i veicoli autonomi si comporterebbero diversamente rispetto ai veicoli guidati da esseri umani? Perché?

A.4.4 Classificazione interfacce

- Per ognuna delle seguenti caratteristiche classifica tutte le interfacce da quella che presenta questa caratteristica in misura minore a quella che la presenta in misura maggiore. 0 (Baseline) 1 (Smile) 2 (Projection) 3 (Smart roads) 4 (Safe roads) 5 (Safe roads extended).
 - Sicurezza percepita
 - Familiarità

- Intuitività
 - Carico cognitivo
 - Efficienza
 - Novità
 - Ambiguità
 - Facilità d'uso
 - Tempo di attesa
- Ordina le interfacce da quella che complessivamente ti è piaciuta di più alla peggiore. 0 (Baseline) 1 (Smile) 2 (Projection) 3 (Smart roads) 4 (Safe roads) 5 (Safe roads extended)

Bibliografia

- [1] Matthias Beggiato, Claudia Witzlack, and Josef F. Krems. Gap acceptance and time-to-arrival estimates as basis for informal communication between pedestrians and vehicles. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, AutomotiveUI '17, pages 50–57, New York, NY, USA, 2017. ACM. ISBN 978-1-4503-5150-8. doi: 10.1145/3122986.3122995. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3122986.3122995>.
- [2] Chia-Ming Chang, Koki Toda, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. Eyes on a car: an interface design for communication between an autonomous car and a pedestrian. pages 65–73, 09 2017. doi: 10.1145/3122986.3122989.
- [3] The virtual eyes have it. <https://www.jaguarlandrover.com/2018/virtual-eyes-have-it>.
- [4] Yeti Li, Murat Dikmen, Thana Hussein, Yahui Wang, and Catherine Burns. To cross or not to cross: Urgency-based external warning displays on autonomous vehicles to improve pedestrian crossing safety. 09 2018. doi: 10.1145/3239060.3239082.
- [5] Shinya Kitayama, Toshiyuki Kondou, Hirokazu Ohyabu, Masaaki Hirose, Haneda Narihiro, and Ryuta Maeda. Display system for vehicle to pedestrian communication. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 03 2017. doi: 10.4271/2017-01-0075. URL <https://doi.org/10.4271/2017-01-0075>.
- [6] Azra Habibovic, Victor Malmsten Lundgren, Jonas Andersson, Maria Klingegård, Tobias Lagström, Anna Sirkka, Johan Fagerlönn, Claes Edgren, Rikard Fredriksson, Stas Krupenia, Dennis Saluäär, and Pontus Larsson. Communicating intent of automated vehicles to pedestrians. *Frontiers in Psychology*, 9, 08 2018. doi: 10.3389/fpsyg.2018.01336.

- [7] Tobias Lagström and Victor Malmsten Lundgren. Avip - autonomous vehicles' interaction with pedestrians - an investigation of pedestrian-driver communication and development of a vehicle external interface. 2016.
- [8] Andreas Löcken, Carmen Golling, and Andreas Riener. How should automated vehicles interact with pedestrians?: A comparative analysis of interaction concepts in virtual reality. In *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, AutomotiveUI '19, pages 262–274, New York, NY, USA, 2019. ACM. ISBN 978-1-4503-6884-1. doi: 10.1145/3342197.3344544. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3342197.3344544>.
- [9] Milecia Matthews, Girish Chowdhary, and Emily Kieson. Intent communication between autonomous vehicles and pedestrians. *CoRR*, abs/1708.07123, 2017. URL <http://arxiv.org/abs/1708.07123>.
- [10] C. G. Burns, L. Oliveira, P. Thomas, S. Iyer, and S. Birrell. Pedestrian decision-making responses to external human-machine interface designs for autonomous vehicles. In *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pages 70–75, June 2019. doi: 10.1109/IVS.2019.8814030.
- [11] Umbrellium develops interactive road crossing that only appears when needed. <https://bit.ly/2U6wAnd/>.
- [12] Marc Hesenius, Ingo Börsting, Ole Meyer, and Volker Gruhn. Don't panic!: guiding pedestrians in autonomous traffic with augmented reality. In *MobileHCI '18*, 2018.
- [13] Scenario windridge city, asset store. <https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/roadways/windridge-city-132222>.
- [14] Hmd samsung odyssey. <https://www.samsung.com/us/computing/hmd/windows-mixed-reality/hmd-odyssey-windows-mixed-reality-headset-xe800zba-hc1us/>.
- [15] Msi vr one backpack pc. <https://www.msi.com/Backpack/VR-One-7RE.html>.
- [16] Amir Rasouli and John K. Tsotsos. Autonomous vehicles that interact with pedestrians: A survey of theory and practice. *CoRR*, abs/1805.11773, 2018. URL <http://arxiv.org/abs/1805.11773>.

- [17] Araz Taeihagh and Hazel Si Min Lim. Governing autonomous vehicles: emerging responses for safety, liability, privacy, cybersecurity, and industry risks. *Transport Reviews*, 39(1):103–128, 2019. doi: 10.1080/01441647.2018.1494640. URL <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1494640>.
- [18] D. Danks e A.J. London. Regulating autonomous systems: Beyond standards. *Expert Opinion*, 2017.
- [19] Jessica S. Brodsky. Autonomous vehicle regulation: How an uncertain legal landscape may hit the brakes on self-driving cars. 2016. doi: 10.15779/Z38JC5S. URL <https://doi.org/10.15779/Z38JC5S>.
- [20] SAE International. *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, 2018. URL https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/.
- [21] B. C. Zanchin, R. Adamshuk, M. M. Santos, and K. S. Collazos. On the instrumentation and classification of autonomous cars. In *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pages 2631–2636, Oct 2017. doi: 10.1109/SMC.2017.8123022.
- [22] Lisa Collingwood. Privacy implications and liability issues of autonomous vehicles. *Information And Communications Technology Law*, 26(1):32–45, 2017. doi: 10.1080/13600834.2017.1269871. URL <https://doi.org/10.1080/13600834.2017.1269871>.
- [23] Jon Walker. The self-driving car timeline – predictions from the top 11 global automakers. 2019. URL <https://emerja.com/ai-adoption-timelines/self-driving-car-timeline-themselves-top-11-automakers/>.
- [24] Victoria A. Banks and Neville A. Stanton. Keep the driver in control: Automating automobiles of the future. *Applied Ergonomics*, 53: 389 – 395, 2016. ISSN 0003-6870. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.06.020>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687015300247>. Transport in the 21st Century: The Application of Human Factors to Future User Needs.
- [25] A. Rasouli, I. Kotseruba, and J. K. Tsotsos. Understanding pedestrian behavior in complex traffic scenes. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3(1):61–70, March 2018. ISSN 2379-8858. doi: 10.1109/TIV.2017.2788193.

- [26] Berthold Faerber. *Communication and Communication Problems Between Autonomous Vehicles and Human Drivers*, pages 125–144. 05 2016. ISBN 978-3-662-48845-4. doi: 10.1007/978-3-662-48847-8_7.
- [27] Raphael Zimmermann and Reto Wettach. First step into visceral interaction with autonomous vehicles. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, AutomotiveUI '17, pages 58–64, New York, NY, USA, 2017. ACM. ISBN 978-1-4503-5150-8. doi: 10.1145/3122986.3122988. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3122986.3122988>.
- [28] Evelyn Florentine, Mark Ang, Scott Pendleton, Hans Andersen, and Marcelo Jr. Pedestrian notification methods in autonomous vehicles for multi-class mobility-on-demand service. pages 387–392, 10 2016. doi: 10.1145/2974804.2974833.
- [29] Yee Mun Lee, Ruth Madigan, Jorge Garcia, Andrew Tomlinson, Albert Solernou, Richard Romano, Gustav Markkula, Natasha Merat, and Jim Uttley. Understanding the messages conveyed by automated vehicles. In *Proceedings of the 11th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, AutomotiveUI '19, pages 134–143, New York, NY, USA, 2019. ACM. ISBN 978-1-4503-6884-1. doi: 10.1145/3342197.3344546. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3342197.3344546>.
- [30] Autonomi autonomous mobility interface. <https://vimeo.com/99160686>, .
- [31] External communication in autonomous driving. http://smartmobility.design/flv_portfolio/external-communication-in-autonomous-driving/, .
- [32] Volvo cars - the 360c: 360° safety. <https://www.youtube.com/watch?v=H5KNPQT72FA>, .
- [33] Together we ride. <https://www.youtube.com/watch?v=9zZ2h2MRcE0>, .
- [34] Marc-Philipp Böckle, Anna Pernestål Brenden, Maria Klingegård, Azra Habibovic, and Martijn Bout. Sav2p: Exploring the impact of

- an interface for shared automated vehicles on pedestrians' experience. In *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct*, AutomotiveUI '17, pages 136–140, New York, NY, USA, 2017. ACM. ISBN 978-1-4503-5151-5. doi: 10.1145/3131726.3131765. URL <http://doi.acm.org/10.1145/3131726.3131765>.
- [35] Shuchisnigdha Deb, Lesley J. Strawderman, and Daniel W. Caruth. Investigating pedestrian suggestions for external features on fully autonomous vehicles: A virtual reality experiment. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 59:135 – 149, 2018. ISSN 1369-8478. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.08.016>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369847818303474>.
- [36] Self driving car that sees you. <https://semcon.com/smilingcar/>.
- [37] G Clercq, Andre Dietrich, Juan Pablo Nuñez Velasco, Joost de Winter, and Riender Happee. External human-machine interfaces on automated vehicles: Effects on pedestrian crossing decisions. 03 2019.
- [38] Self-driving car's front grille showing digital signage for pedestrian. <https://bit.ly/3aaEGAG>, .
- [39] Drive.ai solves autonomous cars' communication problem. <https://spectrum.ieee.org/cars-that-think/transportation/self-driving/driveai-solves-autonomous-cars-communication-problem>, .
- [40] Uwe Gruenefeld, Sebastian Weiss, Andreas Löcken, Isabella Virgilio, Andrew Kun, and Susanne Boll. Vroad: Gesture-based interaction between pedestrians and automated vehicles in virtual reality. 09 2019. ISBN 978-1-4503-6920-6. doi: 10.1145/3349263.3351511.
- [41] How a raised hand from a pedestrian could stop driverless cars. <https://bit.ly/2U6R3bq>.
- [42] Trung Nguyen, Kai Holländer, Marius Hoggenmüller, Callum Parker, and Martin Tomitsch. Designing for projection-based communication between autonomous vehicles and pedestrians. pages 284–294, 09 2019. ISBN 978-1-4503-6884-1. doi: 10.1145/3342197.3344543.

- [43] Karthik Mahadevan, Sowmya Somanath, and Ehud Sharlin. Communicating awareness and intent in autonomous vehicle-pedestrian interaction. pages 1–12, 04 2018. doi: 10.1145/3173574.3174003.
- [44] Airsim. <https://github.com/microsoft/AirSim>.
- [45] Descrizione architettura simd. <https://www.informaticailfaro.it/microprocessori/simd/>.
- [46] Data-oriented vs object-oriented design. <https://medium.com/@jonathanmines/data-oriented-vs-object-oriented-design-50ef35a99056>.
- [47] High definition render pipeline overview. <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.render-pipelines.high-definition@7.1/manual/HDRP-Features.html>.
- [48] Gunnar Johansson and Kåre Rumar. Drivers’ brake reaction times. *Human Factors*, 13(1):23–27, 1971. doi: 10.1177/001872087101300104. URL <https://doi.org/10.1177/001872087101300104>. PMID: 5542208.
- [49] Mercedes benz f 015 luxury in motion. <https://www.youtube.com/watch?v=uj0j56UDUfc>.
- [50] Igor Doric, Anna Katharina Frison, Philipp Wintersberger, Andreas Riemer, Sebastian Wittmann, Matheus Zimmermann, and Thomas Brandmeier. A novel approach for researching crossing behavior and risk acceptance: The pedestrian simulator. pages 39–44, 10 2016. doi: 10.1145/3004323.3004324.
- [51] Shuchisnigdha Deb, Christopher R. Hudson, Daniel W. Carruth, and Darren Frey. Pedestrians receptivity in autonomous vehicles: Exploring a video-based assessment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 62(1):2061–2065, 2018. doi: 10.1177/1541931218621465. URL <https://doi.org/10.1177/1541931218621465>.
- [52] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(3):203–220, 1993. doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3. URL https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.

- [53] Mary Cummings, P. Pina, and Birsen Donmez. Selecting metrics to evaluate human supervisory control applications. 09 2009.
- [54] System usability scale (sus). <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/system-usability-scale.html>.
- [55] Nasa tlx. <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>.
- [56] User experience questionnaire. <https://www.ueq-online.org/>.
- [57] Roy S. Kalawsky. Vruse—a computerised diagnostic tool: for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems. *Applied Ergonomics*, 30(1):11 – 25, 1999. ISSN 0003-6870. doi: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(98\)00047-7](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(98)00047-7). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687098000477>.