

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea Magistrale

**Interfacce Uomo-macchina per
Veicoli a Guida Autonoma: Studio
della User Experience in Scenari
Virtuali**



Relatore
Prof. Fabrizio Lamberti

Candidato
Dario DORONZO

OTTOBRE 2018

Ai miei genitori

Sommario

In letteratura sono stati effettuati diversi studi riguardo l'esperienza utente a bordo di un'auto autonoma ed è stato dimostrato che essa è strettamente collegata alla questione della fiducia ed all'interfaccia uomo-macchina. In particolare, in un'auto semiautomatica l'interfaccia uomo-macchina dev'essere progettata in modo da dare all'utente consapevolezza della situazione di guida, affinché questi sia in grado di riprendere efficacemente il controllo dell'auto quando chiamato ad intervenire. Allo stesso tempo, l'utente ottenendo consapevolezza della situazione, ottiene fiducia nelle capacità dell'auto. Per quanto riguarda un'auto completamente autonoma, la ricerca in merito all'interfaccia utente è stata meno attiva e la relativa progettazione è ancora in fase di definizione. Ad ogni modo, anche per questo tipo di auto dare consapevolezza della situazione aiuta a stabilire fiducia. In questo contesto, il lavoro di tesi è consistito nella realizzazione di una simulazione di guida autonoma in realtà virtuale in cui sono state messe a confronto due differenti interfacce utente. Le interfacce hanno mostrato tramite un "Augmented Reality Head-up Display" (AR-HUD) simulato virtualmente, delle informazioni relative all'interpretazione della situazione di guida corrente da parte dell'auto, in misura diversa. Tale confronto è stato inteso a voler indagare in che misura la consapevolezza della situazione influisse sull'esperienza di viaggio a bordo di un'auto autonoma sul passeggero e come essa fosse relazionata alla questione della fiducia. I risultati ottenuti dal confronto delle due interfacce hanno evidenziato che in un'auto autonoma la consapevolezza della situazione, in misura adeguata, sia una tipologia di informazione apprezzata dall'utente ed utile per stabilire il rapporto di fiducia tra l'uomo e la macchina.

Indice

Elenco delle tabelle	VIII
Elenco delle figure	IX
1 Introduzione	1
2 Stato dell'arte	4
2.1 Definizione e classificazione dei veicoli autonomi	4
2.1.1 I livelli e le funzionalità di assistenza alla guida	5
2.1.2 Obiettivi di un sistema di guida autonomo	7
2.2 Stato dell'arte dei veicoli autonomi	10
2.3 L'auto a guida autonoma del futuro	12
2.4 Il ruolo della fiducia per le auto a guida autonoma	15
2.4.1 La fiducia: teorie e modelli psicologici	15
2.4.2 La fiducia nei veicoli autonomi	17
2.5 Il ruolo dell'HMI nell'auto autonoma	20
2.5.1 HMI in ambito automotive	21
2.5.2 HMI dei veicoli autonomi	22
2.5.3 I dispositivi di visualizzazione	25
2.6 Considerazioni	29
3 Tecnologie	32
3.1 Unity3D	33
3.2 Blender	33
3.3 Substance Painter	34
3.4 Software di simulazione	35
3.4.1 GENIVI Vehicle Simulator	36
3.4.2 Simulatori per la guida autonoma	39

3.5	HTC Vive	40
3.6	Simulatore di guida	41
3.6.1	Simulatore Atomic A3 Racing	43
3.6.2	Configurazione della piattaforma di movimento	44
3.7	Forza Motorsport Wheel Bundle	48
3.8	Leap Motion	49
4	Progettazione e realizzazione	51
4.1	Creazione e configurazione del veicolo	51
4.1.1	Modellazione e texturizzazione del veicolo	51
4.1.2	Configurazione del controller del veicolo	53
4.2	La guida autonoma	54
4.3	Progettazione degli scenari di guida	55
4.4	Progettazione dell'HUD omnicomprensivo	57
4.5	Progettazione dell'HUD selettivo	63
4.6	Realizzazione dell'HUD	64
5	Valutazione dell'esperienza utente e risultati	80
5.1	Fase di testing dell'esperienza utente	80
5.2	Questionario di valutazione	81
5.3	Risultati	82
6	Conclusioni e sviluppi futuri	93
6.1	Conclusioni	93
6.2	Sviluppi futuri	94
A	Questionario di valutazione dell'esperienza utente	95
A.1	Domande Personali	95
A.2	Autovalutazione dello stato di salute pre-simulazione	95
A.3	Autovalutazione dello stato di salute post-simulazione	96
A.4	Senso di immersione e presenza	97
A.5	Fedeltà della simulazione	97
A.6	Valutazione della simulazione di guida autonoma	98
A.7	Valutazione dell'interfaccia HUD	98
A.7.1	Modello mentale	98
A.7.2	Informazioni di tipo Why	99

A.7.3	Competenza del sistema	99
A.7.4	Carico cognitivo	99
A.8	Consapevolezza della situazione	99
A.8.1	Qualità delle informazioni	99
A.8.2	Quantità delle informazioni	100
A.9	Fiducia	101
A.10	Domande Finali	101
Bibliografia		102

Elenco delle tabelle

4.1 AR-HUD ed informazioni visualizzate. 60

Elenco delle figure

2.1	Livelli di automazione definiti dal SAE.	5
2.2	Sensori a bordo di un'auto autonoma.	8
2.3	Schema a blocchi che illustra gli obiettivi di un sistema di guida autonomo e l'interazione tra di essi.	9
2.4	Interni della "concept car" Volvo 360c.	13
2.5	Interni della "concept car" Volkswagen Sedric.	14
2.6	Interni del concept Symbioz di Renault.	14
2.7	Esempio di interfaccia sovraccarica di funzionalità.	22
2.8	Il touch screen centrale della Tesla: esempio di integrazione di più funzioni in contemporanea.	22
2.9	Tre tipologie di dispositivi di visualizzazione.	25
2.10	Gli HUD e le modalità di rappresentazione delle informazioni.	27
2.11	Concept di un'auto autonoma equipaggiata con un AR-HUD.	29
3.1	Interfaccia standard di Unity3D.	33
3.2	Interfaccia standard di Blender.	34
3.3	Esempio di asset texturizzato tramite Substance Painter.	35
3.4	Finestra del menu principale di GENIVI Vehicle Simulator.	37
3.5	Diagramma di flusso di GENIVI.	38
3.6	HTC Vive	41
3.7	Simulatore di guida usato nell'applicazione di tesi.	42
3.8	6DOF	44
3.9	Piattaforma di movimento Atomic A3 Racing.	45
3.10	Il software di controllo della piattaforma Simphynity.	46
3.11	Il software X-Sim.	47
3.12	Compensazione del moto: prima e dopo.	48
3.13	Forza Motorsport Wheel Bundle.	49
3.14	Leap Motion in configurazione VR.	50

4.1	Tesla configurata su Unity.	55
4.2	Scenari di guida utilizzati nell'applicazione.	57
4.3	Continental.	59
4.4	Daqri.	59
4.5	Hyundai.	59
4.6	PSA.	59
4.7	Wayray.	60
4.8	Waymo.	60
4.9	NVIDIA.	60
4.10	Metafora di visualizzazione degli oggetti di tipo <i>bounding box</i>	65
4.11	Etichetta ed informazioni di interesse.	66
4.12	Funzione di resize normalizzata dell'etichetta in Unity. L'asse orizzontale misura la distanza, l'asse verticale misura la dimensione.	68
4.13	Visione di tipo "field of view" in Unity.	72
4.14	Ostacolo con bounding box ed etichetta in Unity.	73
4.15	Sistema di mapping dell'infrastruttura stradale.	76
4.16	Applicazione ripetuta dell'algoritmo di Chaikin.	76
4.17	Linea di pianificazione del percorso.	76
4.18	Linea di mezzeria.	79
5.1	Domande Personali	83
5.2	Stato di salute prima e dopo la simulazione.	83
5.3	Immersione e presenza.	84
5.4	Fedeltà della simulazione.	84
5.5	Simulazione di guida autonoma.	85
5.6	Modello mentale.	86
5.7	Informazioni di tipo <i>Why</i>	86
5.8	Competenza del sistema.	87
5.9	Carico cognitivo.	87
5.10	Qualità delle informazioni.	90
5.11	Quantità delle informazioni.	91
5.12	Fiducia uomo-macchina.	92
5.13	Esperienza di guida autonoma.	92

Capitolo 1

Introduzione

Il campo dell'automazione sta riscuotendo un interesse sempre maggiore da parte della ricerca e grazie ad esso sono stati raggiunti numerosi traguardi in vari campi applicativi. In particolare, uno dei settori che ha subito un'importante accelerazione è stato quello delle auto a guida autonoma. Si tratta di un percorso iniziato negli anni '20, con la presentazione del primo veicolo radiocontrollato e che continua oggi grazie alle intuizioni delle maggiori case automobilistiche e giganti dell'hi-tech, tutti impegnati a progettare un'auto senza conducente. In questa fase di sviluppo e sperimentazione così avanzata, a sostenere le ambizioni delle case produttrici vi è un volume d'affari di 7 trilioni di dollari entro il 2050, secondo le stime contenute nel rapporto di Intel e Strategy Analytics. Secondo il co-autore dello studio, Harvey Cohen, presidente di Strategy Analytics, “la tecnologia autonoma favorirà il cambiamento attraverso un'ampia gamma di settori e definirà un nuovo panorama, i cui primi germogli appariranno nel settore business-to-business”. “L'emergere delle opzioni dei veicoli senza conducente si mostrerà innanzitutto nei mercati sviluppati e reinventerà i settori della consegna e del trasporto su lunga distanza”. Prosegue il report, affermando che l'innovazione introdotta dalle auto autonome darà vita a un settore completamente nuovo, basato sullo sfruttamento del tempo libero a bordo delle auto, man mano che i conducenti diventano passeggeri. Intel ha chiamato questo fenomeno “economia dei passeggeri” e sostiene che quest'ultima “segna la più importante transizione nella mobilità da quando gli esseri umani hanno lasciato il cavallo per una nuova relazione con mezzi di trasporto alternativi”. Le dichiarazioni di Intel e Strategy Analytics sono molto chiare: ci si aspetta che le auto autonome avranno un impatto rivoluzionario sulla società.

Vi è, infatti, un interesse sempre maggiore da parte delle aziende ad investire in questo settore dell'automotive, e questo interesse è soprattutto giustificato dai diversi vantaggi che l'adozione su larga scala di auto a guida autonoma potrebbe offrire. Innanzitutto, va sicuramente menzionata la diminuzione degli incidenti stradali, una delle maggiori cause di morte nel mondo: grazie alla capacità di un veicolo autonomo di reagire in tempi più brevi rispetto all'uomo e di garantire una elevata affidabilità, il numero di collisioni fra veicoli diminuirebbe. Questo permetterebbe, secondo Strategy Analytics di poter risparmiare almeno 585 mila morti su strada. Inoltre, a sua volta, permetterebbe di ridurre la congestione stradale e di offrire la circolazione di un maggior numero di automobili, venendo meno la necessità di

mantenere delle distanze di sicurezza tra di esse. Ci sarebbe anche un miglioramento della gestione del flusso del traffico ed ancora, la scarsità di parcheggi verrebbe superata, visto che l'auto accompagnerebbe il passeggero nel punto richiesto e troverebbe posteggio in uno spazio adeguato, per poi ritornare a prenderlo. Inoltre, il tempo di viaggio sarebbe più breve, vista la possibilità per i veicoli senza conducente di poter procedere a velocità più elevate, con minime possibilità di commettere errori e potrebbe essere impiegato da parte del passeggero in altre attività, mentre qualcuno guida per lui.

Il settore è, come si evince in forte espansione ed il contesto appare certamente favorevole ed entusiastico grazie al progresso tecnologico, al crescente interesse sia da parte degli investitori che dei produttori ed ai promettenti benefici, ma l'adozione e la successiva diffusione dei veicoli autonomi pone inevitabilmente delle sfide da affrontare. Una di quelle più importanti è certamente la sfida culturale. I consumatori sono diffidenti nei confronti della nuova tecnologia e nutrono dubbi sul fatto che l'auto sia in grado di prendere decisioni in maniera autonoma, senza scomodare l'intervento della persona a bordo. Ad amplificare il senso di sfiducia delle persone, hanno contribuito anche le notizie di incidenti mortali che hanno coinvolto diverse case produttrici ed alcuni report in cui si sono evidenziate le lacune tecnologiche dei sistemi di guida autonoma. L'iniziale scetticismo dei consumatori insieme ai recenti avvenimenti, non fanno altro che porre una barriera all'accettazione della tecnologia da parte degli utenti, che si privano, dunque, di poter usufruire dei diversi vantaggi che offrirebbero le auto del futuro. Jack Weast, Chief Architect dell'Autonomous Driving Group di Intel, sostiene il ruolo primario della fiducia nello stabilire quello che sarà il destino futuro delle auto autonome [1]. Per questo motivo, egli ha condotto un esperimento in cui ha invitato un insieme di membri della comunità a farsi trasportare da un veicolo senza guidatore. Inizialmente, i partecipanti sono arrivati all'appuntamento ansiosi e nervosi ma al termine della prova, è stato riscontrato un incremento del loro livello di fiducia. Secondo Intel, questo è stato reso possibile tramite un insieme di interazioni col veicolo fra cui iniziare un viaggio, effettuare modifiche al viaggio, gestire errori e situazioni di emergenza e fermarsi e scendere dall'auto. In altre parole, l'elemento che andrà a ricoprire un ruolo fondamentale per aprire la strada ai veicoli del futuro è l'interfaccia uomo-macchina (HMI) ovvero quella che permette all'essere umano di interagire con il sistema e creare con questo un rapporto di fiducia autentico. In letteratura vi sono degli studi che introducono dei principi da seguire per la progettazione di interfacce utente ma in merito alla progettazione di interfacce per veicoli autonomi vi è meno attività. Sono, invece, in numero maggiore gli studi riguardo la progettazione di interfacce per auto semiautomatiche. Tale situazione può essere dovuta al fatto che al momento le auto proposte sul mercato hanno un parziale livello di automazione e, pertanto, l'interesse della ricerca è ricaduto sulle questioni relative ad esse. Ciò che si nota è che la questione della fiducia gioca un ruolo fondamentale sia per i veicoli parzialmente che per quelli completamente autonomi. Infatti, nel momento in cui l'utente affida la guida del mezzo ad un sistema automatico deve potersi fidare di esso. La progettazione di un'interfaccia utente è anch'essa una questione importante per entrambi i tipi di veicoli, con scopi, però, diversi. Nelle auto semiautomatiche l'interesse è quello di mantenere lo stato di vigilanza dell'utente alla situazione stradale attivo, in modo che egli sappia cosa fare se chiamato all'intervento [2]. Per questo motivo,

l'interfaccia utente deve dare feedback al conducente. Tramite tale feedback egli va a costruirsi un'immagine mentale che gli permette di comprendere le azioni e le intenzioni dell'auto e va ad aumentare la consapevolezza di ciò che succede nell'ambiente [3]. Tuttavia il feedback, e di conseguenza la consapevolezza, dev'essere alto ma non esagerato, al fine di non causare nell'utente un carico mentale eccessivo per poterlo elaborare. Inoltre, l'interfaccia deve seguire il principio di usabilità, ovvero dev'essere semplice, chiara ed intuitiva per l'utente. Tra l'altro, dare feedback all'utente incrementa la sua fiducia nell'auto, quindi il vantaggio è duplice. Per contro, in un'auto completamente automatizzata vi è un cambio di ruolo della persona a bordo che da conducente diventa passeggero. Pertanto, la necessità di dare feedback all'utente non è più giustificata dal fatto che questi possa essere chiamato ad intervenire, ma al massimo, per il fatto che, come suggerito da Intel, esso possa creare quel rapporto di fiducia richiesto per favorire l'accettazione della nuova tecnologia. Inoltre, in letteratura non c'è un'indicazione riguardo l'inclusione o meno di informazione relativa alla situazione di guida nel progetto di un'interfaccia per un'auto autonoma. È in questo contesto, allora, che si inserisce il lavoro di tesi, che si propone di andare a studiare in che misura dare delle informazioni che aumentino la consapevolezza dell'utente sia un qualcosa di utile ai fini di della sua esperienza di viaggio a bordo dell'auto, ad esempio, rendendo il viaggio confortevole o facendolo sentire al sicuro oppure se queste rappresenterebbero per lui soltanto un disturbo. Infatti, in virtù del ruolo di effettivo passeggero, l'utente potrebbe volersi intrattenere in altre attività e non voler essere infastidito dalle informazioni comunicate dal sistema. Inoltre, si potrà considerare, in che misura tale tipologia di informazione contribuisce alla formazione della fiducia con l'auto. Per poter effettuare questa valutazione il lavoro di tesi va a realizzare una simulazione di guida autonoma in realtà virtuale e a far testare a degli utenti due tipologie di interfacce, realizzate a partire dai principi di fiducia, consapevolezza della situazione, usabilità e carico cognitivo, che sono stati ritenuti importanti in letteratura per la progettazione di una buona HMI. Queste interfacce, vanno, dunque, a comunicare all'utente le informazioni riguardo l'ambiente circostante in misura diversa. Dai risultati, sarà possibile, quindi, trarre conclusioni riguardo quanta informazione di contesto stradale includere in un'interfaccia per un'auto completamente autonoma.

Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Definizione e classificazione dei veicoli autonomi

Il termine *autonomo*, in accordo a quanto riportato sul dizionario, si riferisce alla capacità e facoltà di governarsi o reggersi da sé. Secondo l'NHTSA, ovvero l'agenzia governativa statunitense per la sicurezza stradale si definisce auto autonoma “un veicolo il cui funzionamento avviene senza un intervento diretto da parte del guidatore per controllare sterzata, accelerazione e frenata e che è progettato in maniera tale che egli non si aspetti di controllare costantemente la strada, quando la modalità automatica è in esecuzione” [4]. Per poter raggiungere un certo livello di autonomia, l'auto, sfrutta la capacità di rilevare l'ambiente circostante attraverso tecniche come radar, LIDAR, GPS e sensori. Dunque, l'interazione tra tali componenti ed i sistemi di controllo avanzato a bordo dell'auto permette a quest'ultima di prendere decisioni circa i percorsi da seguire ed eventuali ostacoli e segnali da monitorare. Per verificare il grado di autonomia dell'auto vi sono diverse classificazioni e standard coesistenti tra di loro. I più adottati e seguiti dalla letteratura scientifica sono: lo standard pubblicato dall'NHTSA e lo standard pubblicato dal SAE (un ente di normazione nel campo dell'industria automobilistica). Nel Settembre 2016, l'NHTSA ha adottato lo standard SAE J3016, che pertanto si configura come lo standard di riferimento. Quest'ultimo ha stabilito sei livelli di guida autonoma che si basano sul maggiore o minore grado di automazione del veicolo, con relativo livello di partecipazione umana alla guida dell'auto [5]:

- **Livello 0:** Nessuna autonomia. L'auto non ha una funzione di assistenza alla guida ed il guidatore ne ha il pieno controllo;
- **Livello 1:** Assistenza alla guida. Questo livello di automazione prevede che il guidatore prenda le decisioni in merito a quando accelerare, decelerare o sterzare ma sia supportato a livello informativo da altri sistemi che possono indicare la presenza di pericoli o condizioni avverse. L'auto si limita ad analizzare e rappresentare le situazioni sotto forma di alert visivi o acustici. Il guidatore ha la piena responsabilità del veicolo;

- **Livello 2:** Automazione parziale. In questo grado di automazione l'auto è in grado di gestire accelerazione e decelerazione attraverso sistemi di diverso genere come per esempio la frenata assistita e la frenata di emergenza anticollisione. La direzione e controllo traffico restano sotto il controllo del guidatore;
- **Livello 3:** Automazione condizionata. In questo livello l'auto inizia ad automatizzarsi: essa è in grado di gestire accelerazione, decelerazione e sterzata, mentre il guidatore interviene in situazioni problematiche come la guida su strada sterrata o laddove la guida autonoma non sia permessa o sia troppo pericolosa, ad esempio in caso di maltempo. Il guidatore può, dunque, momentaneamente distogliere l'attenzione, ma deve acquisire rapidamente il controllo dell'auto se necessario;
- **Livello 4:** Alta automazione. Questo livello prevede la gestione autonoma di accelerazione, decelerazione, sterzata e controllo del traffico. L'auto provvede a gestire le tipiche situazioni dovute al traffico o alla percorrenza di strade urbane o extraurbane. In questa situazione l'auto è in grado di guidare in completa autonomia ma è possibile per il guidatore riprendere il pieno controllo dell'auto, se egli lo richiede;
- **Livello 5:** Completa automazione. In questo livello, non è richiesto alcun intervento da parte del guidatore. L'auto guida esclusivamente in maniera autonoma gestendo completamente tutti gli aspetti tipici della guida ed in base ai compiti richiesti, si occupa in autonomia di individuare il percorso da seguire, prendere la giusta direzione, accelerare o decelerare in base alle condizioni di traffico o alle situazioni prossime.

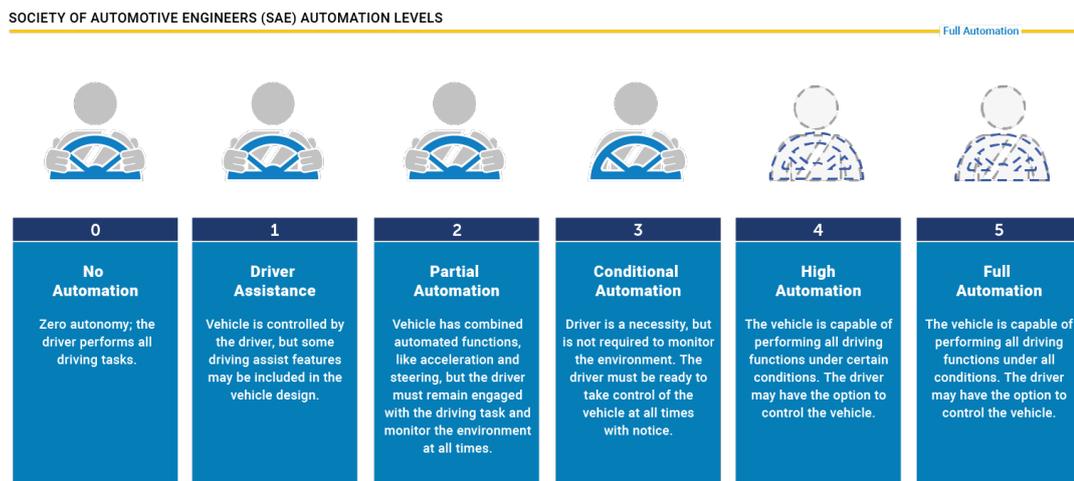


Figura 2.1: Livelli di automazione definiti dal SAE.

2.1.1 I livelli e le funzionalità di assistenza alla guida

Ciascuno di questi livelli necessita di una specifica tecnologia o funzionalità che l'auto si propone di realizzare e per ciascuna funzionalità una tipologia di sensore. In

primo luogo, il livello 1 offre funzionalità come l'ACC (Adaptive Cruise Control) e il LDWS (Lane Departure Warning System). L'ACC è un sistema intelligente in grado di ridurre o incrementare automaticamente la velocità in base alla situazione del traffico mantenendo sempre la giusta distanza di sicurezza durante la guida mentre il LDWS consente di evitare cambi di corsia dovuti ad esempio a sonnolenza o distrazione del conducente, avvisandolo dell'imminente attraversamento delle strisce che delimitano la corsia. Affinché questi sistemi possano operare correttamente è necessario l'impiego di sensori ad ultrasuoni, un sensore LRR (radar per lunghe distanze) ed eventualmente una videocamera per l'ambiente circostante. Un sensore di prossimità ad ultrasuoni utilizza la propagazione del suono per rilevare la presenza di oggetti molto vicini alla vettura. Il radar, sfruttando le onde elettromagnetiche emesse da un'antenna e successivamente riflesse dagli oggetti, permette di localizzarne la posizione. La videocamera è utilizzata per ottenere una descrizione dell'ambiente attorno al veicolo, da mostrare al guidatore.

Proseguendo, un sistema di livello 2 dovrebbe fornire oltre alle tecnologie del livello 1, la funzionalità di LKA (Lane Keep Assist): si tratta di un sistema di mantenimento corsia che assiste il conducente in due maniere: in primo luogo, informandolo, con un allarme tipicamente acustico, che l'auto sta abbandonando la corsia ed impartendo una lieve controsterzata e, in secondo luogo, impartendo costantemente una lieve controsterzata per mantenere l'auto in traiettoria quando è attivato l'ACC. Il PA (Parking Assist) è un'ulteriore funzionalità offerta e fa riferimento ad un tipo di sistema che fornisce un allarme di avvertimento per il conducente che sta effettuando una manovra di posteggio. Anche in questo caso si utilizzano gli stessi sensori che realizzano le funzionalità di livello 1, insieme a dei SRR (radar per distanze ravvicinate) che hanno un range ottimale di operatività compreso tra 0.15 e 30 m rispetto ai 10 – 250 m dei LRR. Si ha, inoltre, l'AEB (Automatic Emergency Braking). Si tratta di un sistema che aiuta ad evitare l'impatto con un potenziale ostacolo identificando in tempo la situazione critica avvisando il guidatore, ed in caso di incidenti inevitabili, ridimensionando la gravità della situazione per mezzo della riduzione della velocità e della predisposizione dell'auto all'impatto.

Un veicolo di livello 3, in base alla definizione del SAE è il primo livello ad offrire una vera e propria autonomia. Oltre alle funzionalità dei livelli precedenti introduce il DM (Driver Monitoring) ed il TJA (Traffic Jam Assist). Il primo valuta lo stato di stanchezza ed attenzione del conducente ed in caso di necessità arresta l'auto in tutta sicurezza. Infine, il secondo si occupa di far avanzare l'auto in maniera autonoma, al di sotto di una soglia di velocità, in situazioni di traffico congestionato. A partire da questo livello, il numero di sensori richiesti aumenta non solo per tipologia ma anche per quantità, in modo da permettere una percezione più accurata dell'ambiente da parte dell'auto. Affinché le nuove tecnologie offerte possano lavorare in maniera ottimale, si introducono un sensore LIDAR (emettitore di impulsi laser che misura la distanza degli oggetti), una videocamera stereoscopica ed una per lunghe distanze, la tecnologia "Dead Reckoning" (navigazione stimata) ed eventualmente dei sensori ad infrarossi o termici. La videocamera basata sulla visione stereoscopica permette di ricostruire la tridimensionalità degli oggetti presenti nell'ambiente e di valutarne la distanza dal veicolo. La tecnologia "Dead Reckoning" permette di calcolare la posizione attuale di un oggetto a partire dalla conoscenza della sua posizione precedente e della sua velocità ed accelerazione. Esso è utilizzato nell'ambito della

navigazione stradale per superare i limiti di perdita del segnale che il GPS mostra, ad esempio, in un tunnel o in una grande città. Il suo intervento permette all'utente di non percepire tale perdita di segnale. La tecnologia LIDAR è basata sull'ottica: utilizza un fascio di luce coerente, di solito luce laser ad infrarossi per determinare la distanza di un oggetto misurando la differenza tra il tempo di emissione della luce pulsata e il tempo di rilevamento del segnale riflesso. Nel contesto dell'automotive questa tecnologia trova impiego nel ricostruire una mappa in tre dimensioni dell'ambiente, il che permette all'auto di percepire l'ambiente circostante. Il suo principale vantaggio consiste nella sua capacità di funzionare indipendentemente dalle condizioni di illuminazione: esso può infatti lavorare in maniera ottimale sia di giorno che di notte. In condizioni di visibilità notturna, scarsa visibilità (nebbia, pioggia o neve) o scarsa illuminazione possono intervenire le videocamere termiche che hanno il compito di monitorare l'ambiente per rilevare la presenza di ostacoli.

La differenza tra un'auto autonoma di livello 3 ed una di livello 4 consiste nel fatto che la prima richiede l'intervento del conducente in presenza di una situazione che non è in grado di gestire, mentre la seconda è in grado di gestirla senza richiedere alcun intervento esterno. Nonostante un'auto di livello 4 sia dotata di un'autonomia considerevolmente maggiore rispetto ad una di livello 3, le tecnologie richieste dal livello 4 non cambiano molto da quelle del livello 3. La differenza principale da un punto di vista tecnologico sta nella capacità di effettuare la "sensor fusion" ovvero la fusione delle informazioni acquisite dai diversi sensori e negli algoritmi che gestiscono il funzionamento della guida. La "sensor fusion" permette, attraverso la combinazione dei dati ottenuti dai diversi elementi di rilevazione di ottenere una comprensione migliore dell'ambiente in cui il veicolo si trova al fine di poter prendere decisioni migliori di quelle che il sistema prenderebbe se considerasse ciascun sensore in maniera indipendente. Combinare insieme differenti sorgenti di informazione mette il sistema in condizioni di ridondanza rispetto a delle condizioni ambientali che potrebbero mettere in crisi dei sensori di una determinata tipologia.

Infine il livello 5 è quello in cui l'auto gestisce qualunque problema che si possa verificare in una qualunque condizione ambientale per mezzo del "pilota automatico" che definisce essenzialmente la capacità di guida autonoma: i sensori e le tecnologie sono visti come un'entità unica, perfettamente integrati tra di loro ed in grado di comunicare l'uno con l'altro per condurre l'auto in maniera sicura e senza intervento umano lungo la traiettoria pianificata [4].

2.1.2 Obiettivi di un sistema di guida autonomo

Dalla precedente classificazione e dalle diverse funzionalità che un'auto autonoma si propone di realizzare a vari livelli, è possibile estrarre e formulare quelli che sono gli obiettivi di un sistema di guida autonomo [6].

Percezione

Con il termine percezione ci si riferisce all'abilità di un sistema autonomo di collezionare informazioni ed estrarre da queste una conoscenza rilevante dell'ambiente

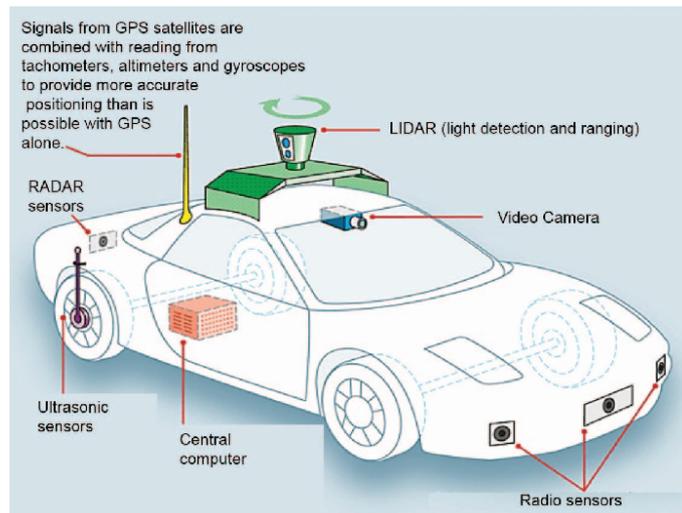


Figura 2.2: Sensori a bordo di un'auto autonoma.

circostante. In particolare si identifica nella percezione ambientale una funzione fondamentale di cui i veicoli autonomi devono disporre, che fornisce a questi l'informazione riguardante l'ambiente in cui stanno operando, includendo le aree libere ma anche quelle occupate da ostacoli, dei quali è calcolata la posizione, velocità ed anche la predizione del loro stato futuro. Sulla base della sensoristica disponibile, il task di percezione ambientale è portato a termine per mezzo di LIDAR, videocamere o dalla fusione delle informazioni provenienti da questi dispositivi. Altri approcci prevedono l'utilizzo di radar e sensori ad ultrasuoni. A prescindere dai sensori utilizzati, i due elementi critici di percezione ambientale sono la rilevazione della pavimentazione stradale e l'individuazione di oggetti posizionati sulla stessa. Inoltre, è associato all'obiettivo percettivo il processo di localizzazione che si riferisce alla capacità del sistema di determinare la propria posizione rispetto all'ambiente in cui esso si trova. Di fatto è impraticabile riuscire a determinare l'esatta posa (posizione e orientamento) del veicolo, pertanto il problema di localizzazione è spesso formulato come un problema di stima della posa. Uno dei metodi più diffusi di localizzazione consiste nella fusione di sistemi di navigazione satellitare, come GPS e GLONASS, e sistemi di navigazione inerziale quali accelerometri o giroscopi associati a tecniche di elaborazione di segnali che stimano l'assetto dell'auto, senza la necessità di basarsi su un'infrastruttura esterna. Ad ogni modo, senza l'utilizzo di ulteriori sensori, l'inizializzazione dei sistemi inerziali risulta difficoltosa, e produce un errore che cresce illimitatamente nel tempo. Analogamente, i sistemi satellitari richiedono dei segnali affidabili dai satelliti e pertanto la loro efficacia dipende dal segnale ricevuto.

Pianificazione

Con il termine pianificazione ci si riferisce alla capacità del sistema di prendere decisioni rilevanti per poter adempiere ad un obiettivo di livello più alto, tipicamente quello di condurre l'auto da una posizione iniziale ad una posizione finale desiderata evitando gli ostacoli, utilizzando degli algoritmi euristici che cercano una soluzione approssimata ma "buona" per il problema. La pianificazione include la pianificazione del percorso che considera obiettivi di alto livello come la definizione dei punti

di partenza/arrivo e la scelta della strada da percorrere. La pianificazione di comportamento fa riferimento alla capacità di prendere opportune decisioni al fine di interagire in maniera appropriata con altri agenti rispettando i vincoli imposti dalle regole come non guidare sul marciapiede, o investire i pedoni; vengono, dunque, perseguiti obiettivi locali come i cambiamenti di corsia, i sorpassi, o la scelta di avanzare ad un incrocio. Infine, la pianificazione di moto genera i percorsi appropriati e/o l'insieme di azioni utili a realizzare obiettivi locali, uno dei quali tipicamente si configura come il raggiungimento di un punto specificato evitando la collisione con gli ostacoli.

Controllo

Con il termine controllo ci si riferisce al processo di conversione delle intenzioni e degli obiettivi stabiliti nella fase di pianificazione in azioni. Il sistema di controllo ha lo scopo di eseguire le intenzioni pianificate dai processi a livello più alto fornendo gli input necessari agli attuatori che provvedono a generare il moto desiderato. Ad esempio, un'auto autonoma è consapevole di dover decelerare in presenza di un semaforo rosso, pertanto, converte questa conoscenza nell'azione che consiste nell'applicazione dei freni. Dei tipici problemi che il modulo di controllo si propone di risolvere sono l'inseguimento di percorso e l'inseguimento di traiettoria. Il primo si riferisce al fatto che l'auto debba raggiungere e seguire un percorso nello spazio cartesiano partendo da una data configurazione iniziale dentro o fuori dal percorso. L'algoritmo di controllo è basato sulla descrizione geometrica della traiettoria cartesiana. La legge temporale di controllo non è specificata poiché l'obiettivo principale è quello di avvicinare il più possibile il veicolo alla traiettoria riducendone la distanza da essa. Il secondo si riferisce al fatto che l'auto debba raggiungere e seguire una traiettoria nello spazio cartesiano partendo da una data configurazione iniziale dentro o fuori dalla traiettoria, ovvero un percorso con una legge temporale imposta.

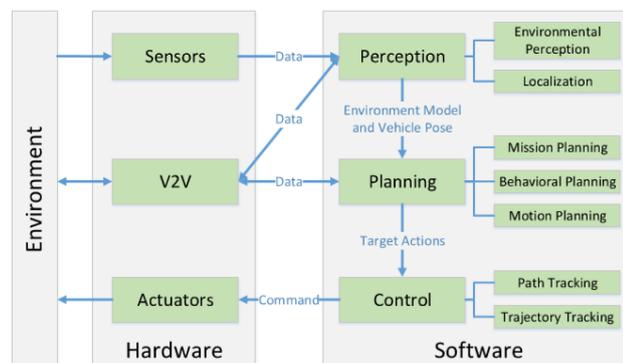


Figura 2.3: Schema a blocchi che illustra gli obiettivi di un sistema di guida autonomo e l'interazione tra di essi.

2.2 Stato dell'arte dei veicoli autonomi

Gli obiettivi presentati sopra, indispensabili per il funzionamento di un sistema autonomo sono ad oggi realizzabili grazie all'incremento della disponibilità e della riduzione dei costi della sensoristica e della potenza computazionale. Si è infatti assistito ad un rapido progresso e ad una maturazione delle tecnologie di guida autonoma con l'inizio dell'ultimo decennio e questo sta permettendo la realizzazione di livelli di automazione sempre più sofisticati. Ad ogni modo la tecnologia pone ancora delle sfide. Ad esempio la percezione ambientale può essere resa maggiormente robusta attraverso la fusione delle informazioni provenienti dai diversi sensori, un'area di ricerca in cui ci si aspetta ulteriore sviluppo al fine di riuscire ad effettuare un utilizzo completo di tutte le informazioni disponibili. Inoltre, i nuovi algoritmi nell'ambito del deep learning per la rilevazione di oggetti hanno mostrato notevoli incrementi di prestazioni, ma devono ancora essere estesi per poter operare con i dati fusi dai diversi sensori. Ancora, nonostante i recenti avanzamenti nella soluzione del problema della localizzazione, si pongono dei problemi riguardo il mapping a lungo-termine. Aggiornare le mappe con i dati statici, topometrici, di attività e semantici al variare del tempo in modo da assicurare al veicolo di potersi localizzare in maniera precisa e consistente rispetto all'ambiente è un argomento di ricerca aperto con molte sfide da risolvere. Nonostante i significativi avanzamenti dimostrati nell'ambito degli algoritmi di pianificazione, si anticipano ulteriori miglioramenti nell'ambito della pianificazione real-time in ambienti dinamici. Anche il campo del controllo ha mostrato un importante progresso negli ultimi anni, tuttavia, molti dei fondamentali risultati ottenuti sono stati validati solo in simulazione. Assicurare che il sistema autonomo persegua le intenzioni dei processi decisionali di livello più alto è cruciale. Infine è stato dimostrato come la cooperazione tra veicoli (V2V) possa incrementare le prestazioni del processo di percezione e pianificazione, ma c'è ancora molto da realizzare per offrire maggiore scalabilità degli algoritmi di cooperazione multi-veicolo e nonostante l'hardware sia stato standardizzato, al momento non esiste ancora uno standard che definisca quali tipi di informazioni i veicoli debbano scambiarsi [6].

Ma le questioni tecnologiche sono soltanto un aspetto, probabilmente minore, di un problema la cui soluzione prevede la valutazione di diverse questioni da considerare. Una di queste riguarda il problema normativo e quello etico. Il primo fa riferimento alla questione legislativa: è necessaria una regolamentazione che vada a modificare il codice della strada per poter permettere la circolazione delle auto autonome. Al momento solo alcuni Stati hanno aperto dei tratti stradali dedicati al transito delle auto autonome [7]. Negli Stati Uniti è possibile il collaudo di talune auto senza conducente a bordo. In Giappone è stato consentito il test di auto autonome senza esseri umani a bordo, purché controllate e monitorate a distanza. In Germania è richiesta ancora la presenza di un essere umano, ma è consentito effettuare dei test tecnologici mentre il conducente può occuparsi di altro, senza l'obbligo di tenere le mani sul volante. La Francia sta preparando un'evoluzione normativa per facilitare e ampliare le opportunità di sperimentazione di auto autonome, a patto che ci sia un essere umano a bordo. Anche l'Italia ha concesso il via libera alla sperimentazione su strada delle auto autonome, pur in presenza di un tecnico che in caso di necessità possa prendere il controllo della situazione. In

particolare, tale sperimentazione è iniziata a Torino che ha predisposto un percorso che comprendesse ogni tipo possibile di situazione di guida allo scopo di testare le auto autonome. Il Regno Unito sta preparando una riforma dell'assicurazione dei veicoli che copra anche incidenti in cui sono coinvolti veicoli automatizzati [8]. A parte questi Paesi, gli altri sono indietro, in attesa che accada qualcosa e non si sono dotati di leggi dettagliate ad-hoc. Inoltre, il problema legislativo va ad intrecciarsi con la questione etico-morale, per la quale non è stata ancora trovata una soluzione definitiva. Questa fa riferimento a chi attribuire la responsabilità in caso di incidente. Chi incolpare in caso di danni, se l'azienda produttrice o il proprietario-passeggero e che decisione far prendere all'auto in merito a chi salvare ad esempio in una situazione in cui l'auto ha davanti a sé ha una scolaresca e deve scegliere, per evitarla, di andare incontro a una collisione con un altro veicolo. Riporta il Prof. Sabbioni, professore associato presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano che "ciò che blocca l'immissione sul mercato di una vettura autonoma sono sicuramente i nodi etici e giuridici, piuttosto che quelli tecnologici per i quali almeno per quanto riguarda determinati contesti stradali si è trovata una soluzione" [9].

Visto il contesto attuale, è interessante andare a valutare le proposte di auto autonome in commercio e verso che direzione si stiano orientando le case produttrici tradizionali e i grandi produttori digitali, anch'essi impegnati nello sviluppo di questo settore. Ad oggi sono disponibili sul mercato diverse auto con tecnologie di livello 2 come frenata d'emergenza, assistenza al parcheggio, sistema di avvertimento abbandono corsia o cruise control adattivo per citarne alcune. Marchi come Tesla, Volvo e BMW commercializzano invece tecnologie a cavallo fra il livello 2 e 3. Per quanto riguarda il livello 3 si può citare, ad esempio l'Audi A8, che permette di eseguire lunghi tratti di marcia e alcune manovre senza l'intervento del conducente, che però deve sempre restare vigile e pronto a intervenire. In particolare, essa introduce il TJP che permette la guida autonoma fino a 60 km/h nel traffico quando l'auto viaggia in presenza di cose o di rallentamenti in strade extraurbane, gestendo accelerazione, decelerazione e sterzata all'interno della propria corsia [7]. "Per quanto riguarda i livelli 4 e 5 al momento questi non sono contemplati dai produttori di automobili e restano per lo più oggetto di ricerca applicata" [10], sostiene Cantamessa, presidente dell'incubatore I3P del Politecnico di Torino. Se questi sono i modelli proposti sul mercato dalle case automobilistiche, diverse invece sono le intenzioni dei colossi digitali. Mentre i costruttori auto propendono per una visione in cui la guida autonoma emerge in modo graduale, delegando al software di bordo inizialmente le condizioni più facili o noiose da gestire (come gli incolonnamenti o la guida in autostrada) i player high-tech, consapevoli delle difficoltà poste nei livelli intermedi, puntano invece direttamente ad una guida autonoma, "considerando questo traguardo alla portata, e immaginando un futuro nel quale le auto senza pilota saranno la norma, mentre la guida umana potrebbe essere proibita o severamente limitata", prosegue Cantamessa. Google ad esempio, con la sua divisione Waymo già da tempo effettua test di guida autonoma su strada con il minivan Chrysler Pacifica, fornito da FCA che rappresenta uno dei primi prototipi di auto autonoma di livello 4.

In realtà, la visione dei player hi-tech, seppur affascinante, "rischia di essere poco realistica. Infatti, le tecnologie di guida autonoma hanno fatto relativamente in

fretta a sviluppare la capacità di guidare in condizioni “facili” prosegue il presidente di I3P. “Tuttavia, risulta ancora difficile affrontare con sicurezza le condizioni più complesse, come il traffico caotico e poco rispettoso delle regole, condizioni meteo estreme, stradine e viottoli. Nessuno acquisterebbe (o assicurerebbe) un’auto a guida che in teoria è completamente autonoma, ma che potrebbe non funzionare in circostanze relativamente frequenti”. La sicurezza delle auto autonome è infatti ancora un punto cruciale. Dai risultati dei test di guida autonoma che diversi produttori hanno effettuato si ottiene una conferma del fatto che le questioni tecnologiche sono effettivamente presenti e pongono dei limiti sull’affidabilità della vettura. Il rapporto pubblicato dal Dipartimento veicoli a motore (DMV) della California ha raccolto tutte le situazioni in cui le auto autonome hanno sperimentato inconvenienti e le persone a bordo hanno rischiato incidenti [11]. Su 800 test, le Tesla hanno richiesto l’intervento del conducente, per evitare collisioni, in 182 situazioni, Nissan ha registrato centinaia di situazioni in cui l’intervento del conducente è stato necessario, Mercedes ne ha registrati 183 ed anche Google con Waymo ha sperimentato 120 casi di malfunzionamenti in un anno. Inoltre, i recenti incidenti mortali che hanno coinvolto Uber e Tesla hanno complicato il problema legale della assegnazione della responsabilità ed hanno ridotto fortemente la fiducia nelle auto autonome. Il fatto che un’automobile valuti autonomamente i rischi grazie ai sensori ed agli algoritmi predittivi, non mette tutti d’accordo: l’assenza della mano umana sul volante è accolta con scetticismo e diffidenza da parte dei consumatori. A confermarlo, un recente studio di AAA (American Automobile Association), una società specializzata nel fornire assistenza durante i viaggi, che mostra che il 75% delle persone intervistate ha manifestato di sentirsi intimorito dalla possibilità di viaggiare a bordo di un veicolo controllato dall’elettronica [12]. Per il momento, quindi, accanto allo sviluppo tecnologico e commerciale, la guida autonoma sembra dover una sfida culturale.

2.3 L’auto a guida autonoma del futuro

Per poter avere una panoramica più ampia nell’ambito delle auto autonome è opportuno considerare, oltre allo stato attuale delle stesse, anche le proposte dei produttori in merito ai veicoli automatizzati previsti per il futuro. A tale scopo, è rilevante menzionare, ad esempio, il concept di auto autonoma del futuro presentato da Volvo. La “concept car” proposta dalla casa automobilistica svedese propone un’auto autonoma elettrica, connessa e sicura che non prevede la presenza di un conducente umano a bordo. Il fatto di optare per un’auto ad alimentazione elettrica piuttosto che a carburante è giustificato dai vantaggi relativi alla maggior sicurezza, minor impatto ambientale in termini di minor inquinamento e ridotta congestione del traffico, e miglioramento della qualità della vita delle persone che risiedono nei centri urbani. Volvo intende offrire diverse opzioni di viaggio per i passeggeri, proponendo un abitacolo con quattro possibili modalità di utilizzo: area riposo, area lavoro, area salotto ed area intrattenimento. Le diverse modalità con cui le persone a bordo potrebbero spendere il loro tempo, ad esempio rilassandosi o rendendolo produttivo ed i vantaggi offerti in termini di comfort, praticità e riservatezza potrebbero favorire l’adozione delle auto autonome come possibili mezzi di trasporto futuri, anche su

lunga tratta: i consumatori potrebbero considerarli come alternative, ad esempio, al trasporto aereo e ferroviario. Per quanto riguarda il comportamento dell'auto autonoma del futuro all'interno del traffico, Volvo sostiene di voler introdurre il veicolo gradualmente, permettendo la circolazione in un contesto di traffico misto, ovvero, in cui vi è coesistenza tra auto controllate da umani ed auto autonome. La comunicazione tra utenti della strada ed auto autonome avverrà per mezzo di un protocollo di comunicazione sicuro, prosegue il produttore di auto: l'auto del futuro andrà a comunicare chiaramente le proprie intenzioni agli altri utenti della strada tramite un sistema basato su suoni, colori, elementi visivi, movimenti e combinazioni di questi strumenti. In questa maniera, l'utente è in grado di comprendere qual è la manovra successiva che verrà eseguita dall'auto [13].



Figura 2.4: Interni della “concept car” Volvo 360c.

È rilevante considerare anche la “concept car” del gruppo Volkswagen: si tratta di un'auto a motore elettrico e priva di conducente. Sedric, nome associato all'auto autonoma del futuro del produttore tedesco è un veicolo che integra delle tecnologie per la guida autonoma di livello 5 grazie alle quali può trasportare in maniera del tutto indipendente un passeggero a destinazione e parcheggiarsi o essere adibita a mezzo di trasporto per persone con disabilità. L'auto non ha comandi nell'abitacolo ed è controllabile in due modi: tramite una ghiera è possibile impostare l'orario d'arrivo e tramite un pulsante è possibile comunicare al sistema di bordo che l'auto deve recarsi a destinazione all'ora stabilita. La vibrazione restituita consente anche alle persone non vedenti di interagire con il sistema di guida autonoma. Tutti i comandi fisici sono stati sostituiti da quelli vocali, pertanto si potrà dare istruzioni vocalmente al navigatore per comunicare il luogo d'arrivo. L'abitacolo, è accessibile in maniera semplice, anche da persone con disabilità. All'interno si trovano due divanetti per quattro passeggeri, oltre a un grande schermo di tipo OLED, che visualizza informazioni sull'ambiente circostante (tramite realtà aumentata) o funge da interfaccia per il sistema multimediale. Inoltre i componenti necessari al funzionamento dell'auto e del sistema di guida autonoma sono posizionati in maniera tale da non occupare troppo spazio per aumentare quello all'interno destinato ai passeggeri [14].

Ancora, è interessante il concept Symbioz proposto da Renault per un'auto autonoma di livello 4, elettrica e connessa. L'interfaccia propone un abitacolo progettato



Figura 2.5: Interni della “concept car” Volkswagen Sedric.

in maniera flessibile, in modo da accomodare i differenti stili di guida che l'auto può adottare. In modalità automatica il volante ed il cruscotto retrocedono in modo da liberare spazio per chi è seduto sui sedili anteriori. Il cruscotto a forma di L (L-Shape) è comprensivo di tre schermi OLED, ciascuno adibito a mostrare informazioni di navigazione, relative alla guida di comfort e di intrattenimento. L'auto è inoltre provvista di un display che si estende sull'intero parabrezza il cui scopo è quello di incrementare la fiducia dell'utente nel sistema autonomo; il sistema di visualizzazione proietta in realtà aumentata informazioni riguardo ciò che rilevano i sensori, o le azioni che l'auto sta per compiere, ad esempio, effettuare un sorpasso, decelerare ecc.. Inoltre il display permette di cambiare velocemente modalità da autonomo a manuale. In quest'ultima modalità esso va a mostrare informazioni semplificate come la velocità o di navigazione. L'interfaccia è controllabile dall'utente tramite dei tasti fisici per dei task veloci, integrazione con lo smartphone dell'utente tramite applicazioni dedicate, bottoni con feedback aptico riconfigurabili e comando vocale che garantisce un controllo veloce e semplice [15].



Figura 2.6: Interni del concept Symbioz di Renault.

2.4 Il ruolo della fiducia per le auto a guida autonoma

Ciò che si evince dallo stato dell’arte dei veicoli autonomi è che allo stato attuale di sviluppo la capacità di autonomia di un’auto, seppur notevolmente migliorata grazie ai progressi tecnologici non si dimostra ancora affidabile e sicura nella sua totalità e questo è confermato dal parziale livello di automatizzazione dei veicoli che i costruttori automobilistici propongono sul mercato. Ciò comporta che in situazioni in cui il pilota automatico fallisce a causa della incapacità dei sensori di funzionare, ad esempio, in condizioni meteorologiche avverse, il guidatore deve riprendere il controllo del mezzo e sapere cosa fare [2]. Quindi, le limitazioni tecniche e la conseguente ripresa di controllo del veicolo da parte del conducente pongono indubbiamente delle questioni relative ai fattori umani. Inoltre, un’auto autonoma, intesa come veicolo in grado di disporre della capacità di guidare senza il controllo dell’utente, suscita timore nei consumatori a causa della nuova tecnologia e dagli episodi negativi che hanno coinvolto alcune case produttrici, e scetticismo: il già citato studio di AAA conferma l’iniziale mancanza di fiducia delle persone ad accettare un viaggio a bordo di un’auto autonoma[12].

2.4.1 La fiducia: teorie e modelli psicologici

Per i motivi di cui sopra, la questione della fiducia risulta un elemento fondamentale per promuovere l’accettazione della nuova tecnologia da parte del consumatore. Jack Weast, ingegnere senior a capo della divisione Guida autonoma di Intel, sostiene che si potrebbe anche essere in grado di costruire un’auto autonoma perfetta dal punto di vista tecnologico, tuttavia, se i consumatori non si sentissero sicuri psicologicamente, non userebbero i servizi offerti da tale auto e quindi non la comprerebbero. È, pertanto, fondamentale creare un rapporto di fiducia tra l’utilizzatore e la macchina, che permetta alla persona di percepire un senso di sicurezza e benessere non solo a livello fisico ma anche psicologico [1].

Quando si considera il concetto di fiducia, è difficile andare a trovare una definizione univoca visto che differenti discipline come la psicologia, sociologia, economia e lo studio dei fattori umani guardano la fiducia da punti di vista differenti, adottando ciascuno una propria definizione. Quando si parla di fiducia, la maggior parte delle persone ha una comprensione intuitiva del concetto di fiducia in qualcuno. Spesso, il senso comune del concetto di fiducia in qualcuno, per le persone, è relativo alla probabilità che una certa persona porti a termine un certo compito ed è così alta che la persona desidera avere un’interazione con la controparte.

Lee & See [16] hanno definito il concetto di fiducia in maniera formale come “l’attitudine di un agente a soddisfare la richiesta di un altro agente in una situazione caratterizzata da incertezza e vulnerabilità”.

Affinché si possa stabilire la fiducia, sostengono Hoff & Chervany, devono essere rispettati determinati criteri: dev’esserci una persona che è disposta a dare fiducia detta “trust-giver”, una che riceve fiducia detta “trustee”, un incentivo per il “trustee” a realizzare un certo compito ed un rischio.

Inoltre, sostengono Ajzen & Fishbein, che il fatto che un certo “trust-giver” sia ritenuto fidato non implica che lo stesso sia ritenuto anche affidabile perché vi sono altri fattori che influenzano tale caratteristica. Infatti, il “trustee” inizialmente ha una certa *credenza* nel “trust-giver”. Tale credenza, poi, può trasformarsi in un’*attitudine* che è associata ad un certo livello di fiducia che il “trustee” ha nei confronti del “trust-giver”. A sua volta quest’attitudine può trasformarsi in *intenzione* ed, in seguito, in *comportamento*. In quest’ultimo caso si ottiene l’affidabilità del “trust-giver”.

Interessante è indagare il processo di formazione ed evoluzione della fiducia interpersonale (tra controparti umane). Esso si basa su tre dimensioni che sono “predictability”, “dependability” e “faith”. Le prime due fanno riferimento rispettivamente alla predicibilità ed all’affidabilità delle azioni compiute dal “trust-giver”, mentre l’ultima riguarda la fiducia che il “trustee” ripone nel “trust-giver” che quest’ultimo continui a comportarsi alla stessa maniera Muir (1987). Il processo di formazione della fiducia uomo-macchina, invece, si basa sugli stessi elementi di cui sopra ad ordine invertito. Infatti inizialmente la componente “faith” assume il ruolo principale che l’operatore ha nell’approcciarsi con il sistema automatico, seguita da “dependability” e “predictability”. Inoltre, sostiene Muir, che la fiducia uomo-macchina può essere vista come una specie di fiducia interpersonale per il fatto che la fiducia nell’automazione può riflettere la fiducia che l’utilizzatore del sistema ripone nei progettisti del sistema stesso.

Mcknight & Chervany [17] hanno individuato tre costrutti necessari ad incrementare la fiducia: *abilità*, ovvero la percezione dell’insieme di competenze e capacità del “trust-giver”, *benevolenza*, cioè la percezione dell’orientamento positivo del “trust-giver” e *integrità*, la percezione che il “trust-giver” aderisca all’insieme dei principi che il “trustee” trova accettabili. Queste caratteristiche, sono state individuate analogamente per la fiducia in un sistema autonomo e si traducono, rispettivamente, in *prestazione*, *scopo* e *processo*. In particolare la *prestazione* si rifà alla possibilità di osservare le operazioni effettuate dal sistema automatico, lo *scopo* è collegato all’uso del sistema definito dal progettista dello stesso, ovvero descrive perché il sistema automatico è stato sviluppato, il *processo* invece è correlato alla comprensione del sistema da parte dell’utilizzatore. Lee & See [16] hanno stabilito, sulla base dei costrutti di cui sopra, che: “la fiducia deriva da una osservazione diretta del comportamento del sistema, da una comprensione dei suoi meccanismi di funzionamento, o dall’uso previsto del sistema. Inoltre, se la fiducia si basa su più elementi fra quelli appena citati, essa diventa più robusta.”

Comprendere come gli utenti percepiscono l’informazione ricevuta è rilevante, dato che la fiducia non dipende dall’effettiva affidabilità del sistema, piuttosto dalla percezione del sistema da parte dell’utente. Pertanto, è rilevante indagare come l’utente elabora l’informazione che gli viene presentata. L’informazione è elaborata cognitivamente in tre modalità: analogica, affettive ed analitica [16]. Il *processo analogico* ricerca delle soluzioni di problemi passati, allo scopo di creare delle regole o procedure, che vengono comparate col sistema, per poter stimare la sua affidabilità. Il *processo affettivo*, invece, si basa su emozioni, impressioni e sentimenti. Il *processo analitico* può essere visto come un ragionamento basato sulla conoscenza

esistente e sull’informazione riguardo il sistema. Quest’ultima è la modalità più impegnativa dal punto di vista cognitivo, dato che l’informazione ricevuta è analizzata in maniera consapevole, e tra l’altro rappresenta il tipo di processo che fornisce il livello di fiducia più elevato[18]. Infatti, esiste una dimensione temporale che regola la formazione della fiducia. In particolare, al primo utilizzo del sistema, l’unica informazione di cui dispone il “trustee” è un’informazione di tipo affettivo. Questa può innescare una possibilità di sviluppare la fiducia analogica per mezzo dell’uso del sistema da parte dell’utente. Soltanto in seguito alla formazione della fiducia affettiva ed analogica vi potrà essere la fiducia analitica, che si trova dunque allo stadio finale del processo di formazione della fiducia.

Nella formazione della fiducia vengono coinvolte differenti variabili che possono essere viste come le componenti di contesto che vanno ad influenzare la persona che riceve fiducia. Hoff & Bashir [19] hanno identificato l’esistenza di tre differenti ma integrate dimensioni della fiducia che sono la *fiducia disposizionale*, che fa riferimento alla formazione di specifiche aspettative personali in merito all’affidabilità ed alla correttezza del “trustee” sulla base della propensione del “trustee”, a fidarsi del “trust-giver”. Questa dimensione è influenzata da fattori quali la cultura, il sesso, l’età, il modo di pensare e gli aspetti caratteriali. La seconda dimensione è la *decisione situazionale a fidarsi*, che si riferisce al fatto che il “trustee” sia disposto comunque a fidarsi quando si presentano specifiche situazioni, non prendendo in considerazione “trust-giver”. Essa è regolata da caratteristiche soggettive del “trustee” che cambiano a seconda dell’umore, stato di attenzione, complessità, rischi e benefici associati al sistema, il carico cognitivo e l’autostima dell’operatore. Si può menzionare, infine, la *fiducia acquisita* che è associata alle esperienze passate e all’interazione col sistema. Inoltre, gli autori hanno considerato insieme ai tre costrutti che regolano la fiducia secondo Mayer et al. [20] la *predicibilità*, che si configura come la percezione che chi ottiene fiducia mantenga un comportamento coerente e consistente, e che quindi le sue azioni siano prevedibili.

2.4.2 La fiducia nei veicoli autonomi

I fattori coinvolti nel processo di costruzione della fiducia di cui sopra possono essere sfruttati per indagare la questione della fiducia nel dominio delle auto autonome. Ad esempio, i dispositivi di visualizzazione di cui sono equipaggiate le auto semiautonome in commercio offrono una panoramica dello stato del sistema e quindi, permettono al guidatore di monitorare lo stato dei componenti dell’auto. Nell’ottica dei fattori influenzanti la fiducia, tali display incrementano l’abilità del sistema e supportano la predicibilità, inducendo, dunque, fiducia. I dispositivi che coinvolgono anche i fattori puramente emozionali possono a loro volta influenzare positivamente la fiducia, visto che vanno a coinvolgere il *processo affettivo* che contribuisce alla formazione della fiducia.

Hoff & Bashir forniscono [19] una serie di raccomandazioni su come progettare i sistemi autonomi allo scopo di incrementare la fiducia dell’utilizzatore. Questo riguarda l’utilizzo di antroporfismo, l’incremento dell’usabilità, la comunicazione gentile, il comportamento trasparente da parte del sistema, e l’opportunità per l’utente di intervenire.

Sulla base di un esperimento etnografico, Lee et al. [21] hanno proposto delle idee su come diminuire il senso di sfiducia nelle vetture autonome. Essi assumono che lo stato di ansia del guidatore indotto dal potenziale verificarsi di situazioni imprevedibili possa essere ridotto una volta che questi possa rendersi conto che l'auto è in grado di gestire in maniera autonoma situazioni di guida differenti. Inoltre propongono l'utilizzo di un agente che abbia un impatto positivo sulla fiducia, ad esempio, instaurando una connessione emotiva con il guidatore. L'agente può essere, ad esempio, un assistente vocale che si mostra all'utente in maniera differente o adotta dei pattern comportamentali diversi a seconda delle aspettative dell'utente. Ad esempio, può intraprendere una conversazione familiare con l'utente in modo da predisporlo positivamente verso l'esperienza di guida autonoma oppure intrattenere in attività differenti, che non riguardino il task di guida può contribuire positivamente al legame di fiducia.

Verberne et al. [22] hanno individuato nella fiducia un fattore importante per favorire l'accettazione della tecnologia autonoma. Sulla base del fatto che la condizione degli obiettivi incrementa la fiducia sociale e le macchine tendono ad essere trattate come gli umani, essi hanno effettuato un esperimento in cui sottoponevano ai partecipanti degli Adaptive Cruise Control (ACC) con differenti livelli di automazione. Hanno, dunque, valutato se tali ACC che condividessero gli obiettivi, influenzassero l'affidabilità e l'accettazione di tali sistemi. Lo studio ha rivelato che gli ACC che hanno preso in carico gli obiettivi, ad esempio, l'adozione di uno stile di guida rilassato e sicuro, l'assenza di frenate o accelerazioni improvvise, l'efficienza energetica e al contempo hanno fornito delle informazioni all'utente si sono rivelati più affidabili e disposti ad essere accettati rispetto a quelli che non hanno fornito alcun tipo di informazione. I risultati ottenuti sono giustificati dal fatto che esaudire gli obiettivi di guida del passeggero ed il fornirgli informazioni rappresenta un modo per ridurre l'incertezza ed il rischio ed incrementare la trasparenza del sistema.

Koo et al. [23] hanno esplorato nel contesto della guida semiautomatica, in che misura il contenuto verbale di un messaggio accostato ad un'azione autonoma compiuta dal sistema possa influenzare l'attitudine del guidatore nei confronti del veicolo. I risultati dello studio hanno mostrato che in uno scenario di guida autonoma è cruciale fornire informazioni al guidatore prima che si verifichi un certo evento. Il fatto di comunicare un messaggio in "feedforward" consente al conducente di rispondere in maniera appropriata alla situazione e di incrementare la propria fiducia verso l'auto, la quale sta operando in un certo modo per una determinata ragione. In particolare, il tipo di informazione che può essere comunicata all'utente è rappresentato da un messaggio che chiarisca il come l'auto sta reagendo ad una certa situazione, detto anche di tipo *how-only*, ad esempio "l'auto sta frenando", oppure il perché, informazione di tipo *why-only*, ad esempio "ostacolo davanti". Lo studio conclude che sarebbe opportuno fornire entrambi i messaggi in situazioni critiche dal punto di vista della sicurezza. Infatti, l'informazione combinata *how + why*, offre la migliore prestazione in termini di sicurezza, al prezzo, però, di un elevato carico cognitivo per il guidatore che si trova ad elaborare una quantità eccessiva di informazioni. In situazioni non critiche dal punto di vista della sicurezza, per contro, la ricezione del solo messaggio *why* è preferita in quanto genera minor ansia e il più alto grado di fiducia nel guidatore.

Haeuslschmidt et al. [24] sostengono che la fiducia in un veicolo autonomo possa essere incrementata tramite un'interfaccia che visualizzi l'interpretazione della situazione corrente da parte della vettura e delle sue corrispondenti azioni. A questo proposito gli autori hanno comparato tre differenti tipi di visualizzazioni (indicatori di direzione, mondo in miniatura, avatar di tipo chauffeur) mostrate su un Head-up-Display (HUD). Il confronto ha evidenziato che una visualizzazione che includesse il fattore dell'antroporfismo come l'avatar, ha indotto un incremento della fiducia. Tuttavia, inaspettatamente, il mondo in miniatura ha avuto effetti considerevoli sulla fiducia dei partecipanti. Ha anche suscitato una notevole sensazione di sicurezza nonché la migliore esperienza utente. L'efficacia del mondo in miniatura è dovuta al fatto che questo suscita una sensazione di maggior competenza e risulta più appropriato ad un sistema tecnico rispetto ad un sistema di visualizzazione più umanizzato. Si è indotti a ritenere che la competenza assuma un ruolo più importante vista la situazione critica dal punto di vista della sicurezza. Gli autori suggeriscono di proseguire la ricerca andando a valutare in che misura la visualizzazione deve rappresentare il contesto di guida ed andando ad esplorare una visualizzazione in realtà aumentata che si estenda sul parabrezza dell'auto.

Lo studio di Ekman et al. [3] rappresenta uno dei lavori più interessanti in merito alla questione della fiducia nel contesto delle auto autonome. Sulla base dei risultati ottenuti dagli studi menzionati in precedenza, gli autori hanno sviluppato un framework che fornisce delle linee guida generali per i progettisti di HMI per auto autonome. Il framework raccoglie le idee proposte dagli altri autori e va a definire 11 fattori innescanti la fiducia:

- **Modello mentale:** rappresentazione approssimata delle funzionalità e competenze del sistema che aiuta l'utente a rendere visibili le intenzioni e le decisioni del sistema;
- **Competenza/Rispettabilità:** il sistema è descritto come un agente competente, ad esempio tramite un'interfaccia esteticamente gradevole;
- **Condivisione degli obiettivi:** il sistema propone degli obiettivi all'utente, ad esempio la possibilità di scegliere tra diversi stili di guida;
- **Apprendimento:** una fase di apprendimento da eseguire precedentemente e successivamente al primo utilizzo del veicolo, permette di incrementare il grado di conoscenza dell'utente delle funzionalità del sistema;
- **Antroporfismo:** l'attribuzione di caratteristiche umane al sistema, ad esempio tramite il nome, il sesso, la voce;
- **Feedback:** la capacità del sistema di fornire un riscontro continuo all'utente, idealmente indirizzato a due o più sensi;
- **Automazione adattiva:** la capacità del sistema di adattarsi sulla base dello stato fisico e psicologico dell'utente;
- **Personalizzazione:** l'abilità di regolare delle funzionalità non critiche del sistema in base alle preferenze dell'utente. Essa differisce dall'automazione

adattiva nel fatto che quest’ultima si basa sulla capacità del sistema di apprendere sulla base delle preferenze dell’utente mentre la personalizzazione è una scelta attiva fatta dall’utente stesso;

- **Informazioni di funzionamento non ottimale del sistema:** informazioni relative all’incapacità del sistema di gestire determinate situazioni in maniera ottimale, ad esempio, l’operatività non ottimale dei sensori o del GPS;
- **Informazioni di tipo *how e why*:** informazioni riguardanti le azioni prossime che il sistema è in procinto di compiere. Un messaggio di tipo *how* descrive in che modo il sistema possa risolvere un certo task, mentre un messaggio di tipo *why* fornisce una spiegazione del perché il sistema sta per effettuare quell’azione;
- **Informazioni di errore commesso del sistema:** informazioni comunicate in seguito al verificarsi di un errore o di un incidente per spiegare il perché si sia verificato e in che misura è stata compromessa la prestazione del sistema.

Il framework sviluppato dagli autori ha come valore aggiunto quello di andare a considerare simultaneamente più fattori innescenti la fiducia, visto che quest’ultima è influenzata da una molteplicità di aspetti. L’intenzione è stata quella di sviluppare un quadro olistico ma allo stesso tempo semplice da comprendere, che aiutasse i progettisti di interfacce utente per auto autonome nell’arduo compito di calibrare la fiducia in accordo alla performance del sistema.

2.5 Il ruolo dell’HMI nell’auto autonoma

Un secondo elemento fondamentale per promuovere l’accettazione della tecnologia di guida autonoma da parte del consumatore riguarda l’interfaccia uomo-macchina, sulla base dello studio sulla fiducia di Ekman et al. [3]. In particolare, l’importanza della “human-machine interface” è collegata sia al contesto attuale che a quello futuro. Il ruolo dell’HMI è critico all’interno dei veicoli semiautomatici disponibili allo stato dell’arte perché rappresenta il punto di comunicazione tra il sistema automatico ed il guidatore. Nei veicoli di livello 2 e 3 infatti, la persona a bordo non può distrarsi dal task di guida ma è chiamata a mantenere l’attenzione al contesto stradale per poter intervenire in caso di necessità, ad esempio in caso di fallimento del pilota automatico. Pertanto, nei periodi in cui è il sistema ad avere il controllo dell’auto, è cruciale che l’HMI mantenga il guidatore coinvolto nel task di guida autonoma e consapevole dello stato del veicolo al suo interno ed esterno (il guidatore è “in-the-loop”): l’interfaccia deve chiaramente comunicare lo stato di automazione e le limitazioni del veicolo in maniera ergonomica e che sia chiaramente visibile e facile da monitorare, al fine di prevenire il fenomeno di “automation surprise”. È prioritario che l’HMI mantenga il giusto livello di consapevolezza situazionale nel guidatore in modo che quest’ultimo non esca dallo stato di attenzione (“out-of-the-loop”), il che causerebbe una perdita della capacità di reazione in condizioni di fallimento del pilota automatico. In quest’ultimo caso, l’HMI deve segnalare al guidatore di riprendere il controllo dell’auto e tale comunicazione deve avvenire realizzando un

compromesso tra tempestività e impegno mentale da parte della persona. L'interfaccia risulta, tuttavia, importante anche in ottica futura: nei veicoli con alto livello di autonomia, ad esempio, livello 4 e 5 il ruolo della persona a bordo cambia: da conducente essa diventa passeggero e l'HMI richiede una riprogettazione, al fine di rendere confortevole l'esperienza di viaggio degli occupanti del veicolo. Ad ogni modo, si pensa di non rimpiazzare completamente gli standard attualmente in vigore che, ad esempio, richiedono la presenza di uno sterzo a bordo dell'auto o di un cruscotto ma di attenersi in un certo senso alle convenzioni esistenti senza stravolgerle ma modificandole all'occorrenza [25]. Ad esempio, nel concept Symbios di Renault presentato in precedenza, quando il pilota automatico è attivo il volante ed il cruscotto retrocedono in modo da ottimizzare lo spazio disponibile davanti al conducente per consentirgli di dedicarsi a nuove attività.

2.5.1 HMI in ambito automotive

Nel corso degli anni, si è assistito ad un cambiamento sostanziale nella progettazione delle interfacce utente delle automobili. Il modello di interfaccia di un'automobile dei primi anni del Novecento si basava sul "controllo diretto", in cui il guidatore aveva a disposizione soltanto una leva ed un indicatore dedicati per ciascuna funzione. Lo spirito era quello di realizzare un design semplice e che non distraesse la persona a bordo dal poter operare il veicolo in maniera sicura. Da quel momento la tecnologia si è evoluta radicalmente e ci si è abituati ad accettare l'idea che tutte le funzionalità tecnologiche offerte dal veicolo venissero presentate contemporaneamente all'utente. Una quantità spropositata di quadranti, manopole e pulsanti abbondavano nell'abitacolo per mostrare quanto il veicolo fosse in grado di eseguire un numero sempre maggiore di funzioni. Questa era la mentalità degli anni '30, periodo storico in cui gli aeroplani divenivano sempre più popolari e diversi brand di lusso proponevano veicoli la cui interfaccia non era concepita esattamente per favorire l'usabilità del prodotto, quanto più per mostrare le capacità tecniche dello stesso, similmente ad un cockpit di un velivolo. I progettisti di interfacce erano, infatti, più propensi a pensare ad un futuro incentrato sulla tecnologia e meno sul consumatore. Questo trend si è prolungato fino agli anni '90 durante i quali si è assistito ad un sovraccarico delle funzionalità offerte dalle HMI.

Con l'introduzione di ulteriori elementi nell'interfaccia, come l'integrazione con lo smartphone, la connettività Wi-Fi e Bluetooth, ed i display touchscreen i progettisti hanno cominciato a rendersi conto che la moltitudine di queste funzionalità non si integrava bene con il concetto di controllo diretto, protagonista fino a quel momento e che distraeva il guidatore. Hanno, pertanto, ritenuto opportuno iniziare un cambiamento, sposando lo spirito di un'interfaccia "on-demand", ovvero le cui funzionalità appaiono in un particolare contesto, quando richieste dall'utente e nel formato per egli più semplice, intuitivo e che non causi distrazione. Un'interfaccia di questo tipo non presenta all'utente tutte le funzionalità offerte contemporaneamente ma permette ad egli di richiedere quella desiderata tramite, ad esempio, dei movimenti gestuali predefiniti. Un ulteriore esempio di interfaccia "on-demand" può essere visto nella personalizzazione del cruscotto in base alle esigenze dell'utente. Si



Figura 2.7: Esempio di interfaccia sovraccarica di funzionalità.

può citare, a tal proposito, il tablet centrale della Tesla che permette di posizionare due funzioni differenti in più pannelli contemporaneamente. Spingendo oltre l'idea, si può integrare nell'interfaccia il concetto di previsione da parte del sistema riscontrabile quando in presenza di un problema, l'interfaccia suggerisce all'utente delle opzioni. Ad esempio se l'auto è a corto di carburante, l'interfaccia suggerisce all'utente la stazione di servizio più vicina. La tendenza delle HMI è, dunque, quella di abbandonare il principio di controllo diretto per sposare quello del controllo semplice, intuitivo e personalizzato su richiesta dell'utente [26].



Figura 2.8: Il touch screen centrale della Tesla: esempio di integrazione di più funzioni in contemporanea.

2.5.2 HMI dei veicoli autonomi

Nel contesto dell'HMI per veicoli autonomi, sono state individuate sei questioni strettamente correlate tra di loro e che si influenzano l'un l'altro in modo complesso. Tali questioni sono la *consapevolezza situazionale*, il fenomeno di *mode confusion*, l'*usabilità*, la *perdita di capacità di guida*, il *carico cognitivo* e la *fiducia*. La *consapevolezza situazionale* è definita come "la percezione di elementi ed eventi ambientali rispetto al tempo o allo spazio, la comprensione del loro significato e la proiezione

del loro stato dopo che alcune variabili sono cambiate, come il tempo, o un'altra variabile, come un evento predeterminato". In via informale, essa riguarda l'essere consapevoli di ciò che sta accadendo nelle vicinanze. La *percezione* fa riferimento alla capacità del guidatore di recepire delle informazioni riguardo lo stato del veicolo interno ed esterno. La *comprensione* riguarda in che maniera l'operatore comprende le informazioni percepite e la *proiezione* si riferisce alla stima di come gli elementi ed eventi ambientali cambino il loro stato nel futuro prossimo sulla base della situazione corrente. Il problema fondamentale riguardo la consapevolezza situazionale si verifica nel momento in cui il sistema autonomo deve restituire il controllo al guidatore. In questa circostanza egli necessita di una grande comprensione di ciò che sta accadendo nell'ambiente in modo da comportarsi in maniera adeguata. L'assenza di feedback da parte del sistema autonomo incrementa il rischio di eccessivo affidamento nel sistema e quindi di incapacità di reazione dell'utente o di commettere errori quando chiamato in causa. Il sistema, invece, deve fornire feedback, al momento giusto, all'utente, in forma ad esempio di informazioni di contesto stradale o relative al sistema stesso.

Il fenomeno di *mode confusion* si presenta nel momento in cui la consapevolezza della situazione è inferiore a quella ottimale. In tale situazione, si determina una differenza tra come il passeggero percepisce che il veicolo stia operando e come effettivamente il veicolo sta operando. La persona, in pratica, non è consapevole dello stato di automazione dell'auto, e potrebbe prendere delle decisioni basate su una convinzione, non corretta, che l'auto si trovi in un certo stato o controlli un certo aspetto della guida quando invece non lo è.

L'*usabilità* è direttamente collegata alla trasparenza del sistema, alla semplicità ed all'accessibilità dello stesso. È, infatti, importante che il sistema presenti l'informazione in modo facile da comprendere per l'utente. Questo è ottenibile progettando dei display in maniera chiara ed intuitiva.

La *perdita di capacità di guida* fa riferimento al peggioramento delle abilità di guida del conducente, che assume un ruolo passivo, a causa dell'eccessivo affidamento nei confronti del sistema oppure a causa del maggior grado di automazione dell'auto, che rende l'utente incapace di comprendere il funzionamento del sistema, in maniera immediata, al primo approccio.

Ancora, il *carico cognitivo* rappresenta la relazione tra l'impegno mentale richiesto per portare a termine un certo compito e le risorse mentali del guidatore. Esso è anche collegato all'abilità del guidatore di comprendere quanto succede attorno a lui. Il sistema automatico, in assenza di condizioni critiche, dovrebbe ridurre il carico cognitivo del conducente che è meno attivo nell'atto della guida. Tuttavia, la riduzione del carico cognitivo procede in parallelo con la riduzione della consapevolezza situazionale. Quindi, l'utente si troverebbe ad avere minor conoscenza della situazione di guida, il che comporterebbe le conseguenze di cui sopra. Per contro, un elevato livello di automazione può comportare un alto carico cognitivo qualora il sistema richieda una elevata supervisione. In particolare, il picco di carico cognitivo si presenta in corrispondenza di un cambiamento improvviso. Le soluzioni legate alla minimizzazione dei problemi relativi al carico cognitivo si basano sul progettare delle interfacce che forniscano l'informazione all'utente al momento giusto, in modo che egli sia in grado di valutarle in maniera completa, avendo tempo di adattarsi

al nuovo livello di carico cognitivo. Inoltre, l'informazione dev'essere presentata in modo che sia semplice, chiara, comprensibile, ad esempio, attraverso degli indizi visivi familiari come delle immagini. Infine, è collegata all'HMI anche la questione della *fiducia*, esaminata in precedenza [27].

Sulla base dei fattori influenzanti l'HMI, sono stati effettuati alcuni studi relativi a come progettartela. Per esempio, Ferati et al. [28] sostengono l'importanza di una interfaccia usabile all'interno dei veicoli autonomi, per promuovere la loro adozione. Una HMI ben progettata permette di incrementare la fiducia dell'utente e di favorire l'accettazione della nuova tecnologia. Inoltre ritengono che l'esperienza utente debba essere progettata in maniera universale in modo che sia accessibile da diverse categorie di potenziali utenti e questo, a sua volta, aumenta l'accettazione e l'usabilità. La progettazione di un'esperienza utente universale può secondo loro essere realizzata tramite un approccio multimodale: fornire delle informazioni all'utente per mezzo di sistemi, ad esempio acustici e visivi, coinvolgendo, quindi, più unità sensoriali. In particolare gli autori suggeriscono che le informazioni riguardo situazioni critiche dal punto di vista della guida vengano comunicate all'utente in una modalità decisa dal sistema e non modificabile dall'utente. Per contro, le informazioni riguardo situazioni non critiche possono essere personalizzate dall'utente che può indicare il canale di comunicazione del messaggio tramite una semplice interfaccia.

Debernard et al. [29] hanno, invece, illustrato una metodologia, che sulla base della "Cognitive Work Analysis" ha permesso loro di identificare e categorizzare le informazioni utili al guidatore al fine di rendere il sistema trasparente. Gli autori hanno formulato 12 principi, raggruppati in tre modelli. Il modello "del task" riguarda la comprensione di un particolare task, l'informazione riguardo gli obiettivi del sistema in un certo momento, l'informazione relativa alla progressione del sistema in relazione a quegli obiettivi e l'informazione riguardo la consapevolezza dei limiti e degli errori del sistema. Il modello "analitico" comunica i principi analitici utilizzati dal sistema per prendere le sue decisioni. L'ultimo modello, quello "ambientale", si riferisce alla capacità del sistema di comunicare la comprensione dell'ambiente e dei vincoli temporali. Tali principi hanno permesso di selezionare l'informazione, inizialmente individuata tramite l'analisi cognitiva, che rendesse il sistema trasparente. Oggetto del prosieguo dello studio sarà l'applicazione di filtri per poter definire l'informazione da visualizzare all'utente. Questo perché, vista la grande quantità di informazione visualizzabile, molta di questa potrebbe non essere facilmente percepibile dal guidatore.

Benderius et al. [25] hanno proposto una HMI per veicoli autonomi che fosse minimalista, ma che comunque desse informazioni di sicurezza ai passeggeri, in modo da mostrare lo stato del veicolo. La comunicazione di tali informazioni avviene mediante un tablet di tipo touch screen posto al centro della plancia, in modo da risultare visibile da tutti gli occupanti del veicolo. Il display permette l'avvio del veicolo e l'inserimento della destinazione. Una volta che il pilota automatico è attivo, esso va a mostrare informazioni di navigazione relative alla direzione che il veicolo ha intenzione di prendere ed informazioni di sicurezza in termini di distanza dall'oggetto rilevato più vicino all'auto.

2.5.3 I dispositivi di visualizzazione

Un elemento fondamentale per quanto riguarda l'HMI riguarda la scelta della modalità di comunicazione delle informazioni all'utente. La modalità visiva risulta quella primaria ed ampiamente utilizzata in tutte le interfacce per veicoli e, di conseguenza, rappresenta il canale di comunicazione più consistente. È interessante, dunque, valutare quali tra i vari dispositivi di visualizzazione si mostrano più efficaci, in primo luogo, nell'ambito dell'automotive in generale, e poi, nel dominio delle auto autonome. Esistono differenti tipologie di dispositivi di visualizzazione utilizzabili all'interno di un veicolo ma fondamentalmente questi possono essere raggruppati in tre categorie. Display di tipo *head-down* (HDD), il cui vantaggio principale è quello di non bloccare la visuale del mondo reale per l'utente, il quale si trova, però, a distogliere l'attenzione dalla strada per poterlo osservare, display di tipo *head-up* (HUD) che, per contro, consentono di fruire delle informazioni necessarie mantenendo lo sguardo verso il contesto stradale; ad ogni modo questo tipo di display pone alcune sfide realizzative, dovute allo scarso livello di visibilità in condizioni di luce diretta e comporta che gli elementi del mondo reale siano ostruiti dagli elementi virtuali proiettati sul parabrezza. L'ultima categoria è quella dei display di tipo *head-mounted* (HMD), che offrono una visione virtuale ad-personam, che si sovrappone al mondo reale; il principale beneficio è quello di consentire la visione delle informazioni a prescindere da dove l'utilizzatore sta indirizzando lo sguardo. Tuttavia, il dispositivo potrebbe ostruire o per lo meno coprire una certa porzione della visuale del mondo reale dell'utente.



(a) HDD.



(b) HUD.



(c) HMD.

Figura 2.9: Tre tipologie di dispositivi di visualizzazione.

In letteratura esistono diversi studi comparativi, in particolare rivolti a confrontare HUD e HDD in guida manuale. Ad esempio, Doshi et al. [30] hanno condotto uno studio utilizzando il parabrezza come display ed hanno utilizzato dei simboli in realtà aumentata per inviare degli alert al guidatore quando questo superasse il

limite di velocità. Gli autori hanno scoperto che l'utente ha mostrato dei tempi di reazione minori utilizzando l'HUD invece che l'HDD, con un tempo di reazione più breve di 1 secondo.

Medenica et al. [31] hanno utilizzato un simulatore di guida per misurare la prestazione dell'utente con un HUD e con un HDD che fornisse due tipi diversi di aiuti alla navigazione. Tramite misurazioni con eye-tracking gli autori hanno scoperto che gli automobilisti sono stati in grado di mantenere lo sguardo sulla strada per un tempo significativamente maggiore di quello ottenuto con l'HDD ed hanno sperimentato un significativo decremento del carico cognitivo.

Altri esperimenti condotti da Charissis et al. [32] hanno dimostrato che un HUD in realtà aumentata può produrre un numero significativamente minore di collisioni in condizioni di scarsa visibilità rispetto ad un HDD. Similmente, Kim & Dey [33] hanno mostrato sperimentalmente come l'utilizzo di un HUD possa determinare un numero minore di errori di navigazione e di guida rispetto ad un HDD standard.

Gli studi effettuati hanno dimostrato, in sostanza, come gli HUD offrano prestazioni migliori rispetto agli HDD. Per quanto riguarda gli HMD, finora le attività di ricerca sono state piuttosto limitate, e lo studio di Jose et al. [34] rappresenta il primo esperimento che si è proposto di confrontare HDD, HUD e HMD insieme. Gli autori hanno sottoposto i partecipanti ad una sessione di guida manuale all'interno di un ambiente simulato in realtà virtuale. Un'interfaccia in realtà aumentata, posta rispettivamente su ciascuno dei tre display, mostrava loro delle informazioni utili a raggiungere una determinata destinazione. I risultati hanno confermato quanto stabilito dalla letteratura precedente, ossia che l'HUD risulta il dispositivo più apprezzato dagli utenti e quello che ha ottenuto il numero minimo di errori di navigazione. L'HMD, invece, si è rivelato il display meno preferito. In particolare, gli utenti hanno apprezzato che l'HUD permetteva loro di non distogliere lo sguardo dalla strada. Al contrario, l'HMD non è stato apprezzato essenzialmente per la sua posizione: i partecipanti lo hanno trovato scomodo e hanno ritenuto difficoltoso focalizzare l'attenzione sul display e sull'ambiente contemporaneamente.

HUD in realtà aumentata

Sulla base della letteratura si evince come l'utilizzo di un HUD possa portare dei benefici. In effetti, è però opportuno considerare anche in che maniera l'HUD possa mostrare le informazioni all'utente. Queste possono essere, infatti, mostrate in maniera spazialmente dissociata rispetto all'ambiente reale, ovvero, un alert è mostrato sul display, ma il guidatore ha comunque bisogno di tempo per cercare l'ostacolo a cui esso si riferisce. L'alternativa è quella di mostrare le informazioni in maniera spazialmente legata al mondo reale, ovvero tramite alert di tipo *contact-analog* o *conformal*. I principi di Gestalt [35] suggeriscono che due stimoli, in questo caso uno virtuale ed uno fisico, sono compresi in maniera più semplice e veloce quando sono vicini spazialmente l'un l'altro. Nel contesto della guida, è stato dimostrato che gli automobilisti traducono un legame spaziale in un legame logico e questo comporta tempi di reazione più brevi, pur generando distrazione a causa della presenza di simboli potenzialmente collocati ovunque nella visione periferica del guidatore.

Una possibilità di presentare all'utente informazioni che siano spazialmente associate all'oggetto a cui si riferiscono è quella della realtà aumentata.



(a) HUD non in modalità contact-analog. (b) HUD in modalità contact-analog.

Figura 2.10: Gli HUD e le modalità di rappresentazione delle informazioni.

Numerose sono le ricerche volte ad indagare l'utilizzo di HUD in realtà aumentata (AR-HUD) in ambito automotive, sia manuale che assistito.

Park ed al. [36] hanno proposto un sistema di informazione in realtà aumentata in grado di offrire all'utente informazioni come l'avviso di collisione frontale, e la navigazione assistita. Gli autori hanno confermato come tale sistema migliori la cognizione intuitiva del guidatore ovvero l'atto cognitivo che si genera nell'intelletto quando questi si trova in presenza di un oggetto attualmente esistente e riduca la distrazione. La ricerca futura sarà orientata a dimostrare un eventuale incremento delle prestazioni e a comprendere come rappresentare le informazioni in maniera ergonomica.

Haeuslschmidt et al. [35] hanno effettuato una comparazione tra un HUD ed un "Windshield display" (WSD), ovvero un HUD che proiettasse sul parabrezza informazioni in modo *contact-analog*, utilizzando come baseline l'assenza di visualizzazioni (NOD). I risultati ottenuti hanno indicato che il WSD determina un comportamento di guida più attento ed una capacità di individuazione degli ostacoli più efficace, in particolar modo in situazioni di guida più esigenti. Visto che la prestazione di guida è direttamente collegata al tempo che l'utente impiega ad osservare la strada [37], i WSD possono migliorare la sicurezza su strada. Inoltre il vantaggio di fornire informazioni in modo spazialmente correlato, caratteristica dei WSD, permette di ridurre i cambi di messa a fuoco del guidatore per rilevare gli ostacoli posti nell'ambiente. Questo comporta tempi di attenzione verso il contesto stradale più lunghi.

Sanchez et al. [38] si sono, invece, occupati di valutare gli AR-HUD in un contesto di guida reale, non, simulato. L'obiettivo principale è stato quello di analizzare l'opinione soggettiva degli utenti nei confronti di questa tecnologia, in particolar modo confrontandola con degli HDD. I risultati hanno mostrato che i partecipanti si sono mostrati abbastanza entusiasti degli HUD. In particolare, in merito alla sicurezza, la maggior parte degli utenti ha considerato gli HUD più sicuri degli HDD, grazie alla loro trasparenza e grazie al fatto che essi sono collocati nel campo visivo del guidatore. Inoltre, gli utenti hanno osservato che eventuali interazioni con questi dispositivi potrebbero essere interessanti, a patto che non causino distrazioni.

In merito al tipo di interazione, essi hanno manifestato una preferenza per i comandi vocali, da loro ritenuti quelli che distraevano meno.

Kim et al. [39], motivati dal fatto che gli approcci tradizionali di rilevamento dei pedoni sfruttano degli alert uditivi o simboli non correlati spazialmente ai target, hanno introdotto una nuova interfaccia di tipo HUD volumetrico in grado di fornire una grafica conforme alla posizione degli ostacoli. Hanno utilizzato come baseline l'assenza di alert. Lo studio ha rivelato che la nuova interfaccia ha permesso di migliorare la prestazione di guida dell'utente. Inoltre, il fatto di rappresentare gli alert in maniera conforme alla posizione dei pedoni ha reso meno brusca la frenata, aiutando gli utenti nella localizzazione degli ostacoli.

Sempre nel contesto della localizzazione dei pedoni, lo studio di Phan et al. [40] conferma come un sistema di assistenza alla guida che offra all'utente dei suggerimenti in AR migliori la sicurezza di guida: il guidatore visualizza un bounding box conforme alla posizione del pedone sulla strada; tale indizio visivo in realtà aumentata incrementa la visibilità del pedone che è localizzato più facilmente e rende il conducente più vigile alla guida.

HUD in realtà aumentata nel contesto della guida autonoma

La letteratura degli AR-HUD usati in un contesto di guida manuale o semiautomatico mostra come l'utilizzo di questi dispositivi possa portare benefici in termini di capacità dell'utente di monitorare la strada e tempi di reazioni più brevi. In merito all'utilizzo degli AR-HUD in guida autonoma la ricerca è meno attiva.

Lo studio di Drezet & Colombel [15], già citato precedentemente, integra un AR-HUD nel progetto di un'HMI per un'auto autonoma di livello 4 che mostra all'utente informazioni di contesto stradale e relative alle intenzioni e decisioni del sistema autonomo allo scopo di incrementare la fiducia dell'utente nel sistema.

Interessante è inoltre il lavoro di Lungaro et al. [41] che presenta una piattaforma innovativa di supporto alla progettazione di un'interfaccia di tipo *human-centric* (incentrata sull'uomo). La piattaforma propone l'utilizzo di due differenti tipi di interfacce in AR in grado di consentire agli utenti di individuare correttamente i potenziali ostacoli presenti nell'ambiente. Tali interfacce potevano essere implementate tramite HUD. È stato, dunque, effettuato uno studio di validazione del sistema i cui risultati iniziali hanno mostrato che entrambe le interfacce hanno indotto un aumento della fiducia dei partecipanti nel sistema, tramite la visualizzazione di informazioni conformi alla posizione degli ostacoli. Gli autori hanno deciso di includere solo modalità visuali per comunicare un feedback all'utente perché queste permettono di comunicare in modo immediato qualcosa in ambienti complessi, ma ritengono di voler esplorare anche modalità aggiuntive come quelle uditive.

Sono molto rilevanti, poi, le parole di Bonte [42], Amministratore Delegato e Vice Presidente presso ABI Research, un istituto di ricerca, leader nel campo della tecnologia e dell'innovazione, il quale sostiene che la tecnologia AR all'interno delle auto autonome permette di creare una esperienza di guida più intuitiva e può aiutare i consumatori nel processo di transizione verso le auto senza pilota. Al momento, sostiene Bonte, i due casi d'uso della realtà aumentata nel contesto dell'automotive

sono quello di fornire istruzioni di navigazione intuitive ed in virtù dei recenti sistemi di assistenza alla guida, di integrarsi con essi, e mostrare informazioni ogniqualvolta la sensoristica rileva qualcosa come un pedone, un'auto o in generale una situazione di emergenza. ABI crede che ci sia ancora ampio dibattito su come presentare al guidatore delle informazioni di avvertimento ed è qui che la realtà aumentata entra in gioco. Questo può avvenire mostrando all'utente informazioni sullo stato del sistema, in modo da evidenziare eventuali fallimenti e, dimostrando che l'auto è in grado di comprendere e reagire al mondo reale. In particolare nel periodo di transizione da manuale ad automatico è importante, sostiene il Vice-Presidente, tenere informato l'utente mostrandogli cosa sta accadendo intorno al veicolo, e palesando che questo è in grado di negoziare rischi ed emergenze. In questo modo sarà possibile guadagnare fiducia nelle capacità e nella prestazione delle vetture automatiche. Ad ogni modo, prosegue Bonte, è opportuno integrare la AR senza arrivare all'abuso. Un sovraccarico di informazione può risultare pericoloso, soprattutto se ad informazioni di contesto e di sicurezza vengono associate notizie commerciali e di intrattenimento. ABI non è in grado di stabilire in modo certo quando vi sarà la penetrazione degli AR-HUD all'interno dei veicoli che si guidano da soli, perché la tecnologia alla base di questi dispositivi è estremamente complessa e pone delle sfide realizzative. Proiettare in modo accurato informazioni tridimensionali nel campo di vista del guidatore richiede un grande livello di precisione e sofisticati software di elaborazione delle immagini. Raggiungere un tale livello di accuratezza è il limite che rallenta la commercializzazione dei display in realtà aumentata.



Figura 2.11: Concept di un'auto autonoma equipaggiata con un AR-HUD.

2.6 Considerazioni

Lo stato dell'arte delle auto a guida autonoma evidenzia che a prescindere dal particolare grado di automazione del veicolo, per favorire l'adozione di questa tecnologia è prioritario andare a valutare i fattori umani, in particolare la fiducia e l'interfaccia

uomo-macchina. Indagare il problema della fiducia è fondamentale in quanto, va a porre un limite all'accettazione della tecnologia: un mancato rapporto di fiducia tra il consumatore e l'auto impedirebbe l'utilizzo di quest'ultima e quindi la sua adozione e conseguente diffusione. Sulla base degli studi riguardo la fiducia tra uomo ed auto autonome si evince che per permettere al consumatore di potersi fidare della nuova tecnologia è opportuno dargli feedback, ad esempio, tramite delle informazioni relative all'interpretazione della situazione di guida corrente da parte dell'auto. Tramite la visualizzazione di queste informazioni la persona a bordo aumenta la propria consapevolezza situazionale ed è in grado di costruirsi un modello mentale sulla base del quale comprendere le intenzioni e le azioni dell'auto. Pertanto, visto che l'auto deve comunicare all'utente delle informazioni e l'HMI rappresenta il punto di comunicazione tra l'umano ed il sistema autonomo, è opportuno valutare anche come progettare l'interfaccia utente. Per quanto riguarda la progettazione dell'HMI per veicoli autonomi, gran parte della letteratura si è soffermata su tipologie di interfacce per veicoli semiautomatici, ovvero quelli attualmente in commercio, andando ad esaminare quelle che sono le questioni di consapevolezza della situazione, usabilità, carico cognitivo e della stessa fiducia, prioritarie nel progetto di una buona interfaccia. Per quanto riguarda le interfacce per veicoli di livello superiore, la ricerca è meno attiva e risultano più interessanti i concept di auto autonome del futuro proposti dalle case produttrici. Questi vanno a concepire l'abitacolo dell'auto come uno spazio in cui i passeggeri possono intrattenersi in altre attività e, quindi, non mantenere lo sguardo rivolto al contesto stradale. Alcuni di questi concept decidono, però, di mantenere comunque una visualizzazione della situazione corrente da parte dell'auto tramite un display di tipo HUD che proietti informazioni in realtà aumentata. Un AR-HUD, sulla base degli studi in ambito manuale e semiautomatico, offre, infatti, diversi vantaggi al conducente come il fatto di ridurre i tempi di reazione e di mantenere lo sguardo rivolto al contesto stradale. Il fatto di fornire delle informazioni di contesto stradale si rivela prioritario in auto semiautomatiche perché l'utente ha bisogno di acquisire consapevolezza situazionale per poter intervenire efficacemente, quando chiamato in causa. Inoltre, permette di incrementare la fiducia dell'utente nei confronti dell'auto, sulla base degli studi sulla fiducia uomo-veicolo autonomo. In un'auto di livello 4 o 5 l'utente assume il ruolo di passeggero, perciò, l'aver consapevolezza della situazione potrebbe non essere un requisito primario: l'utente potrebbe voler impegnare il proprio tempo, ad esempio, in attività di intrattenimento, non soffermandosi sulla situazione di guida. Allo stesso tempo, però, dare delle informazioni relative alla situazione di guida permetterebbe all'utente, come per le auto semiautonome, di acquisire fiducia nell'auto. È interessante, dunque, chiedersi se nel progetto di un'interfaccia per auto autonome di livello 4 o 5 l'inclusione di informazioni di contesto stradale sia un qualcosa di utile o meno ai fini dell'esperienza di viaggio del passeggero, in che misura e di che tipologia. Si potrebbe valutare tale questione effettuando un confronto tra un'interfaccia che fornisca informazioni di contesto stradale in maniera omnicomprensiva, ovvero, che comunichi all'utente tutto ciò che l'auto è in grado di rilevare, per mezzo della avanzata tecnologia a bordo, ed un'interfaccia che moduli la quantità di informazione, offrendone solo una selezione. Si potrebbe, poi, valutare la tipologia di informazioni ritenute più utili dall'utente ai fini dell'esperienza in guida autonoma. Inoltre, dall'analisi del confronto tra le due interfacce si potrebbe anche valutare se

un aumento della consapevolezza della situazione corrisponda ad un aumento della fiducia o meno: nel caso in cui entrambe le visualizzazioni infondano lo stesso grado di fiducia nell'utente, si potrebbe preferire quella con meno informazioni. In questa maniera ci sarebbe un minor carico cognitivo della persona a bordo per elaborare le informazioni che gli vengono presentate dal sistema.

Capitolo 3

Tecnologie

Sulla base delle considerazioni fatte nello stato dell'arte, si è potuto evincere che per un'auto autonoma di livello 4 o 5 è interessante capire come progettare l'interfaccia uomo macchina. In particolare, visto il cambio di ruolo dell'utente da elemento attivo alla guida ad elemento passivo, ci si chiede se la consapevolezza della situazione sia un elemento da includere all'interno dell'HMI. È stato dimostrato che essa assume grande importanza in un'auto semiautomatica e che, inoltre, fornirla all'utente per mezzo di una visualizzazione dell'interpretazione della situazione di guida corrente da parte dell'auto, aumenta la fiducia [24]. Si vuole, pertanto, stabilire se, anche, per un'auto completamente autonoma, dare delle informazioni di contesto sia utile o meno ai fini dell'esperienza di viaggio dell'utente e se aumentarla implichi un incremento della fiducia o meno. Per valutare tale questione è opportuno basarsi sui seguenti elementi:

- simulatore di guida;
- auto a guida autonoma;
- scenario di test;
- interfaccia uomo-macchina.

In primo luogo, per poter realizzare un'esperienza di guida autonoma simulata si è fatta una valutazione di quali potessero essere le tecnologie adatte ad offrire un certo grado di immersività, presenza e realismo nell'esperienza. Questo è giustificato dal fatto che è importante ricreare le condizioni che permettano all'utente di sentirsi all'interno di un'auto reale e, quindi, coinvolto nella situazione di guida; una simulazione priva di tali elementi perderebbe valore in quanto le azioni e le sensazioni dell'utente sarebbero filtrate dal fatto che egli sa di non trovarsi nella realtà ma in un ambiente ricostruito digitalmente. Pertanto, ponendosi come prerequisito l'introduzione di immersione e presenza nella simulazione, si è cercato un strumento che potesse offrirli. Si è deciso di optare per la realtà virtuale, che si pone l'obiettivo di rendere l'esperienza il più possibile simile a quella che ciascuno ha all'interno di un ambiente reale [43].

3.1 Unity3D

Fra i vari motori grafici che offrono supporto per la realtà virtuale, si è individuato in Unity3D, da utilizzarsi in un ambiente Windows, quello più adeguato. Si tratta di uno strumento di authoring integrato multiplatforma, gratuito, tipicamente realizzato per la creazione di videogiochi, ma anche per altri contenuti interattivi come visualizzazioni architettoniche o animazioni tridimensionali in tempo reale. Esso offre diversi vantaggi come il fatto di avere uno Store che permette di scaricare diversi pacchetti, che siano software o asset come modelli tridimensionali, animazioni ecc. pronti per essere utilizzati nell'applicazione. Inoltre, ha una vasta community di supporto, è aggiornato molto frequentemente, si presta perfettamente alla creazione di applicazioni di vario genere ed ha una logica più gestibile, essendo programmabile in C#, un linguaggio di programmazione ad alto livello, rispetto ad altri 3D engine basati ad esempio su C++, il che consente agli sviluppatori di approcciarsi alla fase di game development in maniera più semplice. Per quanto riguarda la gestione dello scripting, ovvero creazione e modifica del codice che gestisce la logica di un'applicazione, e debugging della stessa, Unity si appoggia a due ambienti di sviluppo differenti, Visual Studio di Microsoft o MonoDevelop che fa parte del progetto Mono. Per il lavoro di tesi si è scelto di utilizzare Visual Studio, sulla base dell'esperienza pregressa e positiva nell'utilizzo di questo IDE.

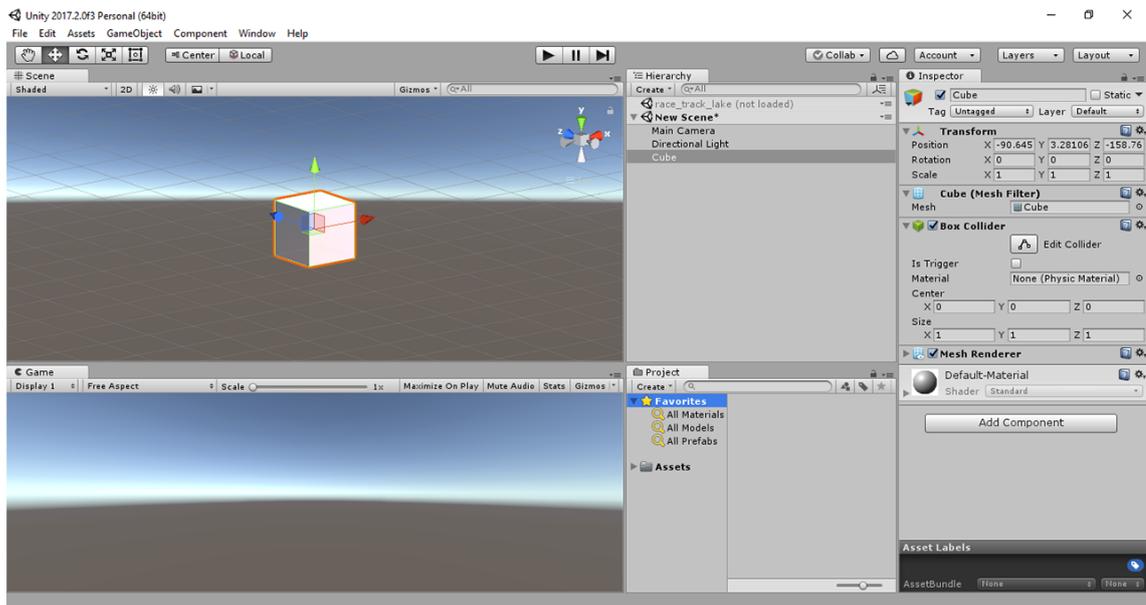


Figura 3.1: Interfaccia standard di Unity3D.

3.2 Blender

Per la gestione di asset esterni, da importare in Unity ci si è affidati a Blender. Si tratta un software di computer grafica tridimensionale open-source, liberamente scaricabile e compatibile con diversi sistemi operativi, che offre un elevato numero di funzionalità multimediali quali la modellazione, texturizzazione, rigging, animazione, compositing, video editing e rendering di immagini tridimensionali. Il suo

beneficio principale è sicuramente il fatto di essere un software libero, utilizzabile anche per scopi commerciali senza richiedere alcun pagamento o licenza. Inoltre, offre una innumerevole quantità di funzionalità, che lo rende assolutamente paragonabile ad un qualunque altro software professionale di grafica, a pagamento. Essendo open-source diversi contributori sono attivi al suo sviluppo, rendendolo sempre più completo e ricco di funzionalità. Ancora, è anche uno dei software di cui è possibile avere diversi esempi pratici su come apprenderlo ed ampio materiale disponibile a partire da modelli tridimensionali fino a textures, plugin, animazioni ecc. Lo svantaggio più noto sta nella sua curva di apprendimento, da molti ritenuta tortuosa a causa di un'interfaccia completamente personalizzabile dell'applicazione e le cui funzionalità non sono immediate da utilizzare. Per questo motivo, non risulta essere la prima scelta in ambito professionale o educativo.

Allo scopo del lavoro di tesi, Blender è stato utilizzato per importare degli asset in Unity, che nonostante l'ampio Store accessibile in rete, talvolta non permette massima flessibilità nel reperimento di ciò di cui si necessita. Ad esempio i modelli del veicolo e delle persone inserite nello scenario di guida sono stati gestiti tramite Blender.

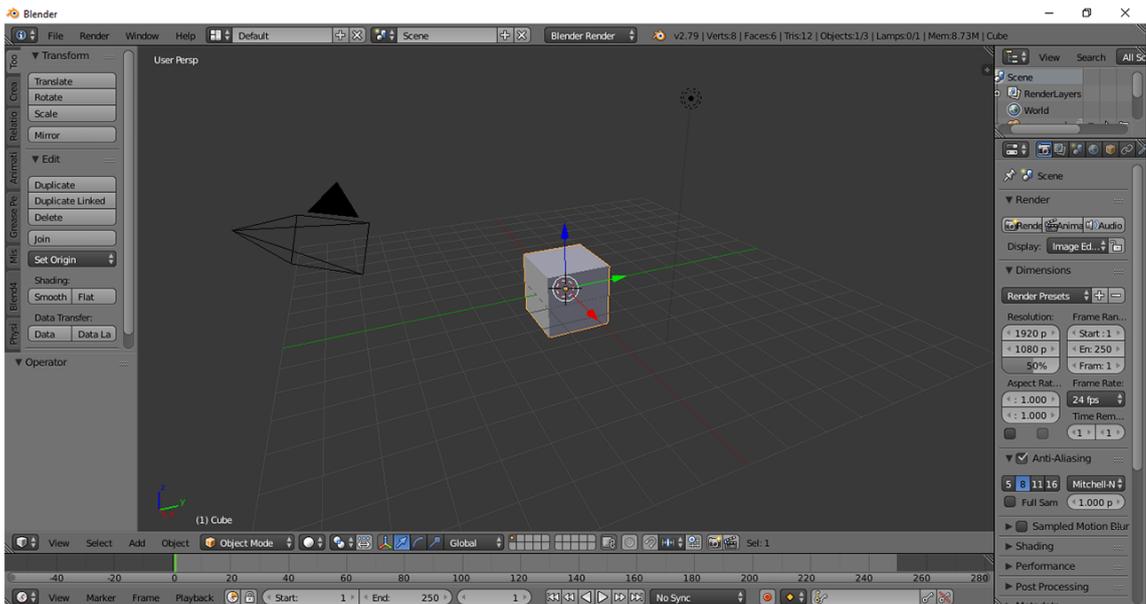


Figura 3.2: Interfaccia standard di Blender.

3.3 Substance Painter

Per quanto riguarda la fase di texturizzazione degli asset, ad esempio citati prima, pur potendosi affidare allo stesso Blender, si è deciso di optare per Substance Painter, software sviluppato da Allegorithmic, a cui sempre più artisti digitali si affidano per dipingere le proprie immagini. Si tratta di un programma di nuova generazione, specializzato in painting e texturing tridimensionale. Esso permette di generare materiali incredibilmente realistici, utilizzando effetti procedurali da applicare sul modello, semplicemente dipingendoci sopra. È opportuno soltanto che l'artista di

preoccupi di importare il modello, comprensivo dell'unwrap, nel programma, in un certo formato, ad esempio `.fbx` o `.obj`. A quel punto è possibile procedere a creare ed applicare il materiale sull'oggetto.

Il vantaggio principale del software consiste nel fatto che va a basare il proprio motore di rendering sulla tecnica "Physically based" (PBR). Quest'ultima permette di ottenere una rappresentazione più accurata di come la luce interagisce con la superficie degli oggetti, essendo basata su considerazioni fisiche e permette di ottenere texture più realistiche, offrendo un workflow più omogeneo per gli artisti. Substance rende la fase di creazione ed esportazione delle texture molto "artist-friendly" in quanto già di default offre una serie di materiali, abbastanza comuni, che possono essere applicati agli oggetti, con poco sforzo da parte dell'utilizzatore, che può comunque personalizzare le proprie texture in base alle proprie esigenze o creare ulteriori materiali, non previsti di base dal programma. Inoltre, il software è ben integrato con Unity e con lo stesso Blender in quanto fornisce dei preset per l'esportazione delle immagini in entrambi i programmi. Sia il primo che il secondo hanno infatti, di recente integrato la funzionalità di rendering PBR (Unity a partire dalla versione 5 e Blender a partire dalla versione 2.79) e quindi sono compatibili con Substance. Le immagini generate da quest'ultimo possono benissimo essere importate in Unity, generando un effetto visivo molto simile.

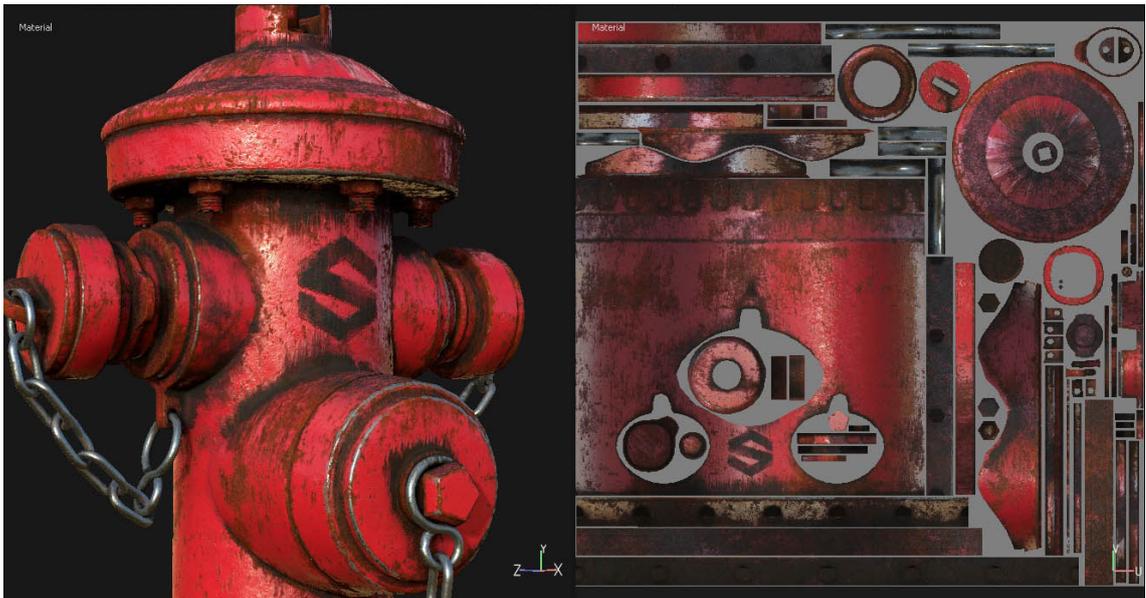


Figura 3.3: Esempio di asset texturizzato tramite Substance Painter.

3.4 Software di simulazione

Una volta scelto l'ambiente di sviluppo, si è indirizzata la ricerca verso un simulatore di guida open-source, che fosse modificabile, in modo da personalizzare l'esperienza in base alle esigenze del lavoro di tesi: ovvero la realizzazione di un'esperienza di guida autonoma in realtà virtuale che includesse degli scenari di guida ed un'interfaccia utente. Unity offre diversi asset e pacchetti scaricabili, a pagamento, sui quali

poter assemblare un simulatore per auto ma si è preferito cercare una base da cui partire che includesse per lo meno degli ambienti e se possibile anche un controller che simulasse il comportamento fisico di un'autovettura. La ricerca ha inizialmente condotto al simulatore di guida autonoma sviluppato da Udacity, un'organizzazione educativa che offre corsi di studio. Il simulatore è utilizzabile per il “behavioural cloning” ovvero clonare il comportamento in guida manuale di un utente in modo tale che l'auto sia in grado di riprodurlo in maniera autonoma. Si possono, quindi, o generare dei dati di training o testare un modello di machine learning. Tuttavia per quanto lo strumento fosse già stato usato per scopi di ricerca universitaria e fosse open, esso offriva un'esperienza di guida non particolarmente realistica, in quanto il veicolo era dotato di un controller molto minimale e che seguiva poco il comportamento fisico. In aggiunta, l'esperienza in guida autonoma risultava abbastanza scadente ed offriva degli ambienti particolarmente semplicistici. Si è deciso, pertanto, di scartarlo.

3.4.1 GENIVI Vehicle Simulator

La preferenza è, dunque, ricaduta su un altro strumento di simulazione, GENIVI Vehicle Simulator, sviluppato da GENIVI Alliance, un'organizzazione no-profit nel campo dell'industria automobilistica che si occupa di diffondere l'adozione di software open-source per “in-vehicle infotainment” (IVI) e per le auto connesse.

Lo scopo di realizzazione del progetto è stato quello di fornire un simulatore open source, estendibile con altre funzionalità, che fosse utile per la comunità. Pur essendoci differenti utilizzi dell'applicazione, l'obiettivo principale è stato quello di creare uno strumento che fornisse assistenza nello sviluppo e testing di sistemi IVI per degli utenti che si distraessero dalla guida. Il progetto, sviluppato su Unity, offre diverse funzionalità. In primo luogo presenta tre possibili scenari di guida: Yosemite, Pacific Coast Highway e San Francisco. Il fatto di disporre di tre scenari immediatamente utilizzabili si è rivelato molto importante in quanto ha permesso di risparmiare una grande quantità di tempo che altrimenti si sarebbe dovuto spendere nella preparazione dell'ambiente (modellazione e relativa texturizzazione), requisito alla base della simulazione.

In secondo luogo, un ulteriore elemento importante offerto dal simulatore è il controller del veicolo, ossia l'elemento che permette la guida della vettura, implementato secondo le leggi della fisica e personalizzabile tramite una dettagliata interfaccia in diversi parametri come gli RPM, la coppia frenante, i coefficienti di attrito degli pneumatici, ecc. In aggiunta, è inviato in output un flusso di dati in formato CSV che gestisce l'applicazione di instrument cluster. Questo insieme di dati fa riferimento a informazioni specifiche della sessione di guida come la velocità corrente, le infrazioni commesse, la posizione e l'orientamento del veicolo ecc. Questo consente di comparare la guida e i dati di infotainment mostrati sull'interfaccia grafica, in tempo reale. L'applicazione permette anche la creazione di ostacoli (dall'amministratore), mentre un altro utente guida. Se il guidatore urta un ostacolo, l'evento è memorizzato in un file di log come un'infrazione che può essere revisionata una volta terminata la sessione di guida. Gli ostacoli al momento disponibili sono un pedone, differenti tipi di animali, veicoli in stallo, delle palle da gioco, una caduta di massi,

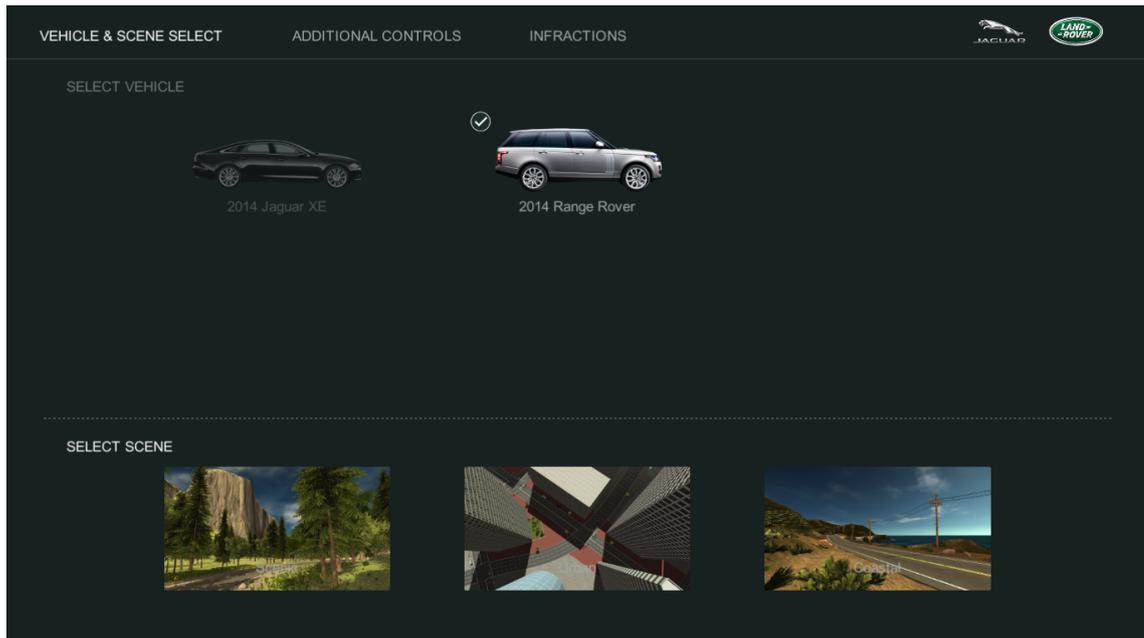


Figura 3.4: Finestra del menu principale di GENIVI Vehicle Simulator.

e ciascuno di questi è inseribile nello scenario in cui avrebbe senso innescarlo, ad esempio gli animali si possono tipicamente introdurre in uno scenario extraurbano piuttosto che in quello urbano. La presenza di ostacoli si è rivelata importante in quanto ha permesso di utilizzare i relativi modelli per personalizzare l'ambiente ad esempio includendo i pedoni o delle situazioni tipiche di un particolare contesto di guida. Il file di log permette di salvare le seguenti infrazioni: passaggio in presenza del segnale di stop, passaggio in presenza del semaforo rosso, attraversamento di una doppia striscia continua in presenza di una singola corsia per senso di marcia, collisione con gli elementi dell'ambiente, con degli ostacoli immessi dall'amministratore o con le macchine del traffico. Al termine della sessione si guida, l'amministratore ed il guidatore possono controllare le infrazioni commesse nella sessione più recente tramite degli screenshot che mostrano le infrazioni insieme a delle informazioni relative al veicolo stesso come la velocità, il tipo di infrazione, ed il tempo in cui è stata commessa la stessa. Quindi, i dati di sessione sono esportati in un file di tipo XML o CSV. Ancora, un elemento fondamentale, presente nell'ambiente urbano è il sistema di traffico intelligente. L'infrastruttura stradale dell'ambiente urbano (una versione in miniatura della città di San Francisco) contiene una grande quantità di incroci, ed un certo numero, regolabile, di veicoli del sistema di traffico, in grado di prendere decisioni su quale direzione prendere ad un incrocio, rispettare i semafori ed i segnali stradali e seguire il flusso del traffico. È a questo proposito rilevante menzionare il sistema di mapping dell'infrastruttura stradale di San Francisco tramite un sistema di waypoint che vanno a definire un insieme di percorsi predefiniti che i diversi veicoli del sistema di traffico intelligente possono seguire, in maniera randomica. L'importanza della rete stradale è stata notevole perché ha permesso di personalizzare l'ambiente includendo il traffico e di poter prendere spunti dalle auto del traffico, su come implementare l'algoritmo di guida autonoma. Una ulteriore funzionalità importante è la presenza di una modalità di guida autonoma, limitata però al solo scenario di guida extraurbano, Yosemite, utile per il medesimo scopo di

cui sopra.

In figura 3.5 è riportato il diagramma di flusso dell'applicazione:

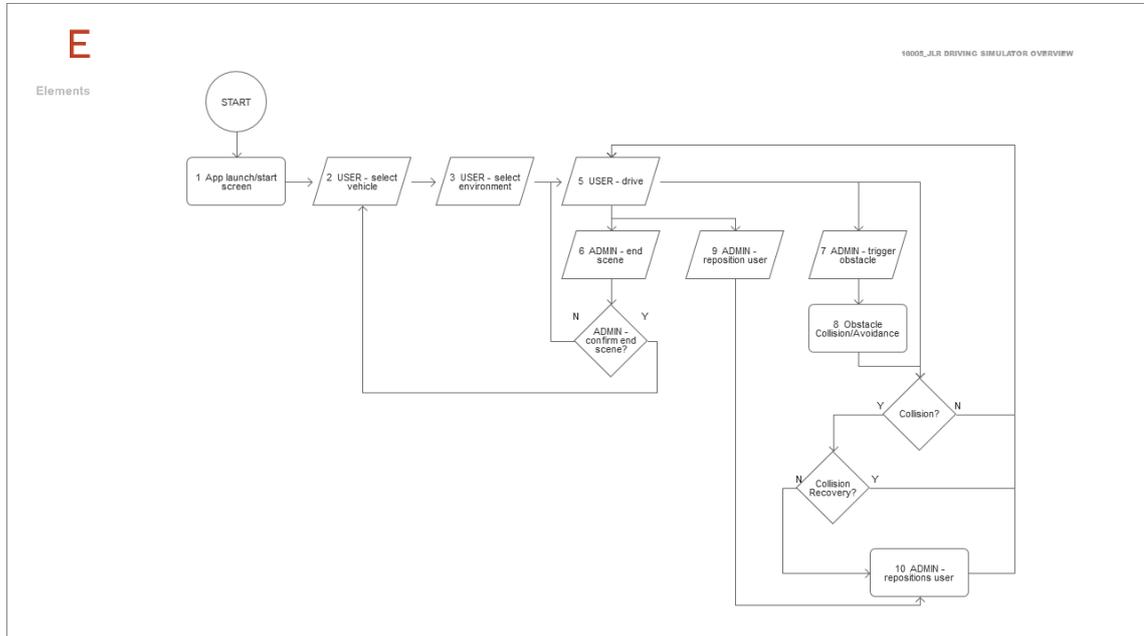


Figura 3.5: Diagramma di flusso di GENIVI.

Il sistema è configurabile per operare con diversi sistemi audio. Il suono può essere stereo, 5.1, 7.1, ecc. e diverse configurazioni audio sono state testate ed implementate.

Inoltre, l'applicazione può essere controllata con una interfaccia di tipo tablet che è offerta dalla scena principale. L'interfaccia consente all'amministratore di selezionare un veicolo, selezionare lo scenario, innescare un ostacolo, cambiare le condizioni meteorologiche e l'orario, modificare le condizioni della strada. Per connettere un tablet all'applicazione è necessario aprire un browser ed inserire l'indirizzo IP più porta 8088 della macchina che ospita la scena principale.

L'applicazione di default è impostata per essere trasmessa su tre proiettori dotati della funzionalità di edge blending, ed essere visualizzata su uno schermo parabolico 11" × 28" per proiezione frontale. La risoluzione è di 4992 × 1080. L'applicazione supporta il rendering stereo (tramite Nvidia o rendering stereo nativo di Win8). È stata anche testata su tre display in 4K e si è sperimentato un frame rate decente (pur non in 3D). Ulteriori configurazioni di visualizzazione sono possibili.

Un monitor aggiuntivo con risoluzione di 1920 × 720 può essere utilizzato per mostrare il pannello di controllo del veicolo (instrument cluster). Questo mostra, durante la sessione di guida, le informazioni di velocità e giri al minuto ed è controllato tramite un flusso di dati esportati in CSV su TCP/IP.

Inoltre il sistema offre supporto per alcuni dispositivi di input come lo sterzo: è garantito il funzionamento del volante Logitech G27, il sistema SimSteering di Leo Bodnar (entrambi con il supporto per il force feedback) ed il volante Thrustmaster T300RS. È possibile anche utilizzare l'input da tastiera.

3.4.2 Simulatori per la guida autonoma

Si ritiene, visto che si è parlato di GENIVI, considerare anche diverse alternative che potrebbero essere utilizzate per applicazioni legate alla guida autonoma. Diverse sono le aziende che attualmente stanno proponendo dei simulatori per la guida autonoma, in particolare allo scopo di ottimizzare il funzionamento del software del sistema autonomo ed incrementare il volume e la velocità della fase di apprendimento, rendendo il metodo efficiente. A tal proposito si ritiene rilevante citarne alcuni:

Il simulatore Cognata realizzato dall'omonima startup israeliana permette di accelerare la fase di training del software di un sistema autonomo attraverso delle situazioni di guida realistiche, ricostruite virtualmente. Il simulatore offre la creazione di interi ambienti urbani comprensivi di pedoni, altri veicoli e differenti condizioni meteorologiche, in cui possono guidare le auto ed apprendere costantemente dalla innumerevole quantità di scenari generabili. Il simulatore ha un'architettura a tre livelli basati su differenti tipi di algoritmi di deep-learning. Il primo è un livello statico che comprende gli oggetti che fanno parte dell'ambiente come le strade, gli alberi, e le strisce di delimitazione delle corsie. Il secondo livello, dinamico, aggiunge elementi come veicoli, pedoni e le condizioni meteorologiche. Il terzo livello gestisce il rilevamento dell'ambiente: i modelli presenti nel software di simulazioni sono dotati di 40 sensori, che simulano come risponderebbero ad elementi statici e dinamici dell'ambiente in modo da generare dati che l'auto possa elaborare. Il valore aggiunto del simulatore sta nel fatto che offre la possibilità di testare casi limite in simulato, e non in reale, e questo è un passo importante per quanto riguarda la sicurezza della auto autonome.

Rilevante è anche il simulatore rFpro, lanciato dall'omonima azienda di simulazione inglese, che permette di effettuare il training e lo sviluppo di veicoli autonomi in simulato. Il software utilizza un ambiente ricostruito digitalmente per rappresentare in maniera accurata il mondo reale, permettendo i produttori auto di testare i loro sistemi in ogni scenario immaginabile. Il valore aggiunto del simulatore è quello del grado di accuratezza con cui replica il mondo reale. Questa accuratezza permette ai vari sensori di reagire in maniera naturale all'ambiente, pertanto, i risultati dei test sono completamente significativi. rFpro utilizza una tecnologia a precisione elevata di scansione dell'ambiente che produce una libreria di strade reali, che formano il livello base della simulazione. Essendo una piattaforma digitale, gli utenti hanno il pieno controllo su qualunque variabile, ad esempio sul traffico, sui pedoni e sulle condizioni meteorologiche, il che permette di testare ogni tipologia di situazione. Questo permette di accelerare la fase di testing delle auto autonome e, soprattutto, di condurla in un ambiente sicuro.

Si può menzionare, inoltre il simulatore CARLA, ovvero una piattaforma open-source rilasciata da un team degli Intel Labs e del Computer Vision Center, sviluppata per la ricerca nell'ambito della guida autonoma e per il testing degli algoritmi. CARLA rappresenta in maniera realistica la fisica dell'ambiente, ad esempio le forze, la massa, l'attrito e la resistenza dell'aria. Inoltre, per lo sviluppo degli algoritmi di percezione dell'ambiente, esso rappresenta in maniera fotorealistica il mondo virtuale, in modo che assomigli a quello reale. Il simulatore, implementato in Unreal

Engine, motore grafico sviluppato da EPic Games, offre una serie configurabile di sensori, e la capacità di cambiare le condizioni meteorologiche. Il risultato è un ambiente particolarmente realistico che si presta al training e testing degli algoritmi percettivi.

Anche Microsoft, ha fatto il suo ingresso nell'ambito della simulazione per la guida autonoma, aggiornando la piattaforma open-source AirSim al supporto delle auto autonome. Il simulatore, basato su Unreal Engine include una API ben fatta, un motore fisico estremamente potente, ed una grafica estremamente realistica. In particolare offre uno spazio urbano dotato di segnaletica stradale, semafori, pedoni, cantieri ed altri veicoli, tramite cui creare delle tipiche situazioni che gli utenti si trovano ad affrontare durante la guida quotidiana. Anche questo software permette di effettuare il training di algoritmi di machine learning, e quindi, portarli nel mondo reale. Il simulatore progettato dal colosso di Redmond permetterà, dunque, di limitare i test su strada soltanto alle tecnologie mature, mentre le altre potranno utilizzarlo per effettuare dei test dei loro algoritmi di guida autonoma.

NVIDIA, invece, propone un simulatore per la guida autonoma, DRIVE Constellation, in realtà virtuale. Esso permette il testing e la validazione di miliardi di chilometri sul datacenter. DRIVE Constellation utilizza una simulazione fotorealistica allo scopo di offrire un modo più sicuro, più scalabile e più efficiente dal punto di vista dei costi per portare le auto autonome su strade reali. Esso si basa su due server che gestiscono una piattaforma basata su cloud, capace di generare miliardi di miglia da testare. Un server ospita il software DRIVE Sim che va a simulare i sensori a bordo del veicolo, come le camere, il LIDAR ed il radar. Delle potenti GPU generano dei dati fotorealistici che vanno a creare un ampio numero di ambienti e scenari di guida da testare. Ad esempio è possibile sperimentare condizioni di guida in presenza di bufere, tempeste di neve ,ad orari del giorno variabili, con differenti tipologie di asfalto ed un ambiente circostante variabile. L'altro server contiene il software di intelligenza artificiale che esegue sull'auto autonoma. Quest'ultimo elabora i dati, come se provenissero dai sensori di un'auto che sta realmente circolando su una strada.

3.5 HTC Vive

Una volta individuato in GENIVI il software di simulazione appropriato per il lavoro di tesi, si è indirizzata la ricerca verso il dispositivo di realtà virtuale per la realizzazione dell'esperienza immersiva in prima persona. Si è deciso di utilizzare il sistema HTC Vive, progettato da Valve in collaborazione con HTC, che tramite un visore ottico permette di vedere l'ambiente simulato. Lo strumento è dotato di due pannelli di tipo AMOLED con diagonale da 3.6", ciascuno avente una risoluzione di 1080×1200 pixel per occhio, (2160×1200 di risoluzione complessiva). Il display è aggiornato ad una frequenza 90 Hz ed ha un angolo di visualizzazione pari a 110° . Il punto forte del dispositivo è sicuramente l'efficace capacità di tracciatura dell'ambiente che viene garantita dall'utilizzo di due rilevatori ambientali da posizionare all'interno della stanza che si vuole tracciare. Grazie ad un tracciamento al laser i sensori sono in grado di riconoscere i movimenti della persona. È quindi possibile

realizzare esperienze in piedi ed in movimento con il Vive. In più vi sono diversi sensori all'interno del visore: una videocamera che consente all'utente di osservare i dintorni senza togliersi il visore ed identificare potenziali ostacoli, statici o dinamici all'interno della stanza, una serie di sensori ad infrarossi che servono a determinare la posizione corrente dell'headset all'interno dello spazio, un giroscopio, un accelerometro ed un sensore di prossimità. Inoltre, rilevante è la possibilità di utilizzare tracker esterni che permettono di introdurre nel mondo virtuale qualunque oggetto. Questa possibilità si rivelerà utile nel prosieguo del lavoro per realizzare la cancellazione del movimento dell'headset dell'utente quando questi stia partecipando all'esperienza virtuale.



Figura 3.6: HTC Vive

3.6 Simulatore di guida

Un altro obiettivo che ci si è preposti di introdurre nell'esperienza è il realismo. A tal proposito, si è deciso di utilizzare una piattaforma di movimento, che ha lo scopo di indurre nell'utente la sensazione di trovarsi effettivamente all'interno di un veicolo reale [43].

La capacità della piattaforma di stimolare l'utente deriva dall'indurghi delle “motion cues” (indizi di movimento) la cui percezione è dettata da come gli umani percepiscono il loro corpo e l'ambiente circostante. Questa percezione è regolata dal cervello che interpreta i segnali provenienti da vari sistemi sensoriali, come la vista, l'udito ed il tatto. In particolare, speciali unità sensoriali dette recettori, traducono gli stimoli in segnali sensoriali. Ad esempio gli esterocettori rispondono a degli stimoli provenienti da fonti esterne vicino al corpo, come la luce che stimola la vista, la pressione del suono che stimola l'udito o la temperatura che stimola il tatto. Gli interocettori sono, invece, sensibili a fenomeni provenienti dall'interno dell'organismo.

Il controllo posturale è mantenuto attraverso i riflessi vestibolari agenti sul collo e sugli arti. Tali riflessi, che sono alla base di una sincronizzazione motoria efficace



Figura 3.7: Simulatore di guida usato nell'applicazione di tesi.

sono controllati da tre elementi: i propriocettori, il sistema vestibolare ed il sistema visivo. I propriocettori, ovvero i recettori collocati nei muscoli, tendini, articolazioni ed orecchio interno, inviano segnali al cervello riguardo la posizione del corpo. Il loro ruolo è quello di presentare al cervello una visione di dove si trova il corpo nello spazio, mentre su di esso agiscono delle forze. Ad esempio nel passaggio di un semaforo da rosso a verde l'utente, azionando l'acceleratore per ripartire, percepisce una sensazione di schiacciamento contro il sedile. Questa esperienza è trasmessa, tramite i propriocettori, al cervello, il quale, a sua volta, interpreta quest'informazione come un'accelerazione. Viceversa, in caso di una frenata improvvisa, i propriocettori localizzati nelle mani, nei piedi e lungo la schiena offrono la percezione della pressione in avanti contro la cintura. Quest'informazione è nuovamente presentata al cervello ed interpretata come una decelerazione. I propriocettori smettono però di reagire in caso di velocità costante. In questo caso il cervello si basa su degli indizi visivi finché non avviene un altro movimento e ne viene percepita la forza risultante. Nella simulazione di movimento, in caso di fallimento dei sensori interni nel rilevare il moto, si verifica un effetto chiamato "washout". Quest'effetto fa percepire all'utente una sensazione di moto continuo quando, in realtà, il moto non c'è. In altre parole, il "washout" si presenta quando il simulatore ritorna di fatto ad una posizione neutra, di riferimento, per prepararsi al movimento successivo. Il ritorno alla posizione centrale deve accadere senza che l'utente ne sia a conoscenza. Questo aspetto è molto rilevante e va a modellare il modo con cui gli umani percepiscono il movimento nel mondo reale.

Il sistema vestibolare, localizzato nell'orecchio interno, agendo in sinergia con l'apparato somatosensitivo e quello visivo assicura l'equilibrio del corpo registrando la posizione ed il movimento della testa nello spazio. Esso determina il movimento del corpo monitorando le informazioni che provengono da ognuno dei movimenti nei 6 gradi di libertà delle 3 dimensioni spaziali (3 movimenti rispettivamente di traslazione e di rotazione). I recettori, inclinandosi, consentono di misurare accelerazioni lineari. Data l'equivalenza della gravità e dell'accelerazione lineare, possono

anche misurare l'inclinazione della testa. Questo fatto è sfruttato dai simulatori per indurre sensazioni di accelerazione laterale e vestibolare, come quelle effettivamente percepibili in una situazione di guida reale, in fase di curva, accelerazione o frenata. Tuttavia, in caso di accelerazioni sostenute per un tempo compreso fra i 10 e 20 secondi, in una specifica direzione, i recettori tornano alla posizione di riposo, ed il cervello non è più in grado di percepire tale accelerazione. Ancora, vi è una soglia, al di sotto della quale i recettori non sono in grado di rilevare alcun movimento. In altre parole, un movimento lento e sufficientemente graduale non influenza il sistema vestibolare. Questo consente di realizzare il “washout” e fintanto che la piattaforma si muove ad una velocità sotto soglia, il soggetto non si renderà conto dell'effetto washout.

Infine il sistema visivo rappresenta la più importante sorgente di informazione nella simulazione di movimenti. Gli occhi inviano al cervello immagini circa posizione e velocità del veicolo. Di conseguenza, è essenziale ai fini di una simulazione realistica che gli indizi di movimento provenienti dalla piattaforma lavorino in sincronizzazione con la scena visualizzata. Infatti, nel mondo reale gli indizi di moto sono elaborati dal cervello prima dei cambiamenti visivi, e questo deve essere analogo per un sistema di simulazione, altrimenti l'utente potrebbe provare nausea o vertigini, che impatterebbero negativamente sulla piacevolezza dell'esperienza.

Quindi, sulla base della percezione umana degli indizi di movimento, l'approccio standard seguito dai simulatori consiste nel simulare indizi riguardo l'accelerazione iniziale quanto meglio possibile. Tali indizi possono essere visivi, uditivi o somatosensoriali. Gli indizi visivi ed uditivi permettono all'umano di percepire la sua posizione all'interno del mondo, mentre quelli somatosensoriali (associati all'apparato vestibolare) forniscono un feedback riguardo le accelerazioni. La velocità non è percepibile direttamente attraverso gli indizi, come quelli del sistema vestibolare. Ad ogni modo un cambio di velocità è percepito come una accelerazione, oppure come una forza agente sulla persona. Nel caso di accelerazione lineare costante, visto che l'uomo non è in grado di percepirne bene il modulo, il simulatore inclina il soggetto all'indietro ed utilizza la gravità per rimpiazzare la forza risultante dalla gravità e dall'accelerazione lineare. In questo caso, inclinare la piattaforma all'indietro e ruotare l'immagine dello stesso angolo porta il soggetto a percepire una forza applicata sulla sua schiena ed interpretata come accelerazione lineare [44].

3.6.1 Simulatore Atomic A3 Racing

Le piattaforme di moto possono supportare il movimento fino a 6 gradi di libertà differenti. Questi sono i tre gradi di rotazione (roll, pitch, yaw) ed i tre gradi di traslazione (surge, heave, sway).

In più, possono essere classificate in accordo al fatto che l'occupante stia o meno controllando il veicolo. I primi sono, ad esempio, simulatori di guida o di volo mentre l'altra categoria, quella dei simulatori passivi, si riferisce a sistemi usati, ad esempio, nei parchi a tema. Ai fini del lavoro di tesi si è considerato il simulatore Atomic A3 Racing, progettato da Atomic Motion Systems, società che costruisce simulatori di guida ultra-compatti ad alte prestazioni per uso casalingo e commerciale. Si tratta di una piattaforma di moto che offre un movimento ad alta fedeltà

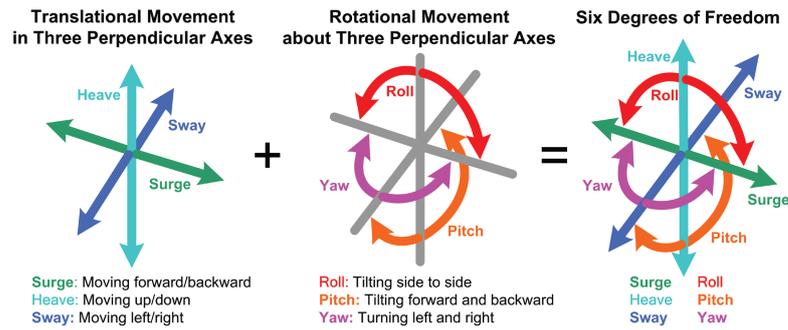


Figura 3.8: 6DOF

ed accelerazioni potenti per provare un'esperienza di guida coinvolgente. Essa ha 2 gradi di libertà (yaw e pitch) rispetto ai 6 disponibili, garantiti da due attuatori ad alta velocità, elevata precisione 400 mm/s (100 N), dotati di motori passo-passo senza manutenzione, tecnologia ForceAssist che massimizza le prestazioni minimizzando i requisiti in termini di potenza e controller a 100 Hz RealFeel che assicurano che un movimento privo di jitter impartisca il movimento organico. Sono inoltre disponibili due bass shaker allo scopo di riprodurre le vibrazioni del motore, la cui intensità è regolabile tramite il guadagno e la frequenza di cut-off dal software di controllo. Ancora, la piattaforma offre un range di movimento a doppio asse di 27°, una coppia di 64 N m, bassa potenza (150 W) ed ottima portabilità grazie al peso esiguo di 50 kg. Il sistema è in grado di simulare delle accelerazioni rapide in caso di cambi di direzioni, presenta un update a bassissima latenza (100 Hz) e delle velocità fino a 71 °/s. Questo assicura una riproduzione verosimile, fra le varie, di: superficie stradale, cambi di marcia, malfunzionamenti del motore ed impatti con oggetti.

Per l'interfacciamento della piattaforma con dei dispositivi esterni è presente una connettività mediante USB 2.0 ed un'interfaccia Ethernet standard di tipo RJ45 che opera all'unisono con il sistema passeggeri di AMS RideNet: è possibile creare dei profili di configurazione da assegnare a ciascun sedile, qualora voluto. Il sistema è controllabile tramite il software di base Simphynity, che permette la personalizzazione dell'esperienza mediante i profili utente in cui è possibile preprogrammare i settaggi di movimento della piattaforma.

3.6.2 Configurazione della piattaforma di movimento

Dopo aver scelto il simulatore di guida, si è proceduto alla configurazione della relativa piattaforma di movimento: si è condotta una prima fase per renderla operativa ed una seconda per interfacciarla con l'applicazione di tesi.

Per rendere operativa la piattaforma è necessario collegarla tramite l'interfaccia USB alla macchina su cui andrà ad essere installato Simphynity. In particolare, il software di AMS permette di impostare i seguenti parametri:

- accelerazione: valori più alti forniscono un feedback molto aggressivo, adatto a simulatori di auto da corsa, valori più bassi si prestano a movimenti più organici ed adatti, ad esempio a simulatori di volo;



Figura 3.9: Piattaforma di movimento Atomic A3 Racing.

- distanza di movimento: l'inclinazione della piattaforma è scalabile in entrambi i gradi di movimento sulla base delle preferenze dell'utente;
- curva di controllo del movimento: una curva lineare va a riprodurre una forza g su base 1:1, mentre una curva logaritmica va ad amplificare i dettagli fini, ad esempio, la pavimentazione stradale;
- posizione del sedile: la posizione a riposo del sedile può essere modificata;
- Vibrazione dei bass shaker: l'intensità dei trasduttori tattili che riproducono le vibrazioni del motore è regolabile tramite il guadagno e la frequenza di cut-off;
- Movimento verticale: regolazione dell'effetto della "V-force" ovvero il movimento verticale della piattaforma.

Dopo di che, Simphynity va automaticamente a rilevare un simulatore di guida, qualora esso sia presente nella lista di titoli supportati dal software e sia installato sulla macchina. Inoltre quest'ultimo offre compatibilità con Unity per mezzo di uno script da collegare al veicolo di interesse. Tale script si propone di calcolare dei dati di telemetria ed inviarli via rete. Simphynity riceve tali dati e calcola i valori di pitch e roll che permettono di generare il movimento della piattaforma e li invia a questa tramite interfaccia USB. Il programmatore, in questo caso, si limita a collegare lo script ma non c'è bisogno di alcuna modifica del codice per permettere l'interfacciamento della piattaforma con Unity ed il suo funzionamento.

Tuttavia, ci si è resi conto che per l'applicazione, il movimento della piattaforma non risultava soddisfacente ed in alcune configurazioni come il passaggio da velocità molto bassa, ad esempio da 1 km/h a velocità nulla, la piattaforma effettuava un brusco movimento, ritenuto particolarmente fastidioso. Pertanto, si è cercato un ulteriore software che permettesse di regolare in maniera più efficace i parametri di movimento della piattaforma e permettesse di risolvere i problemi riscontrati in

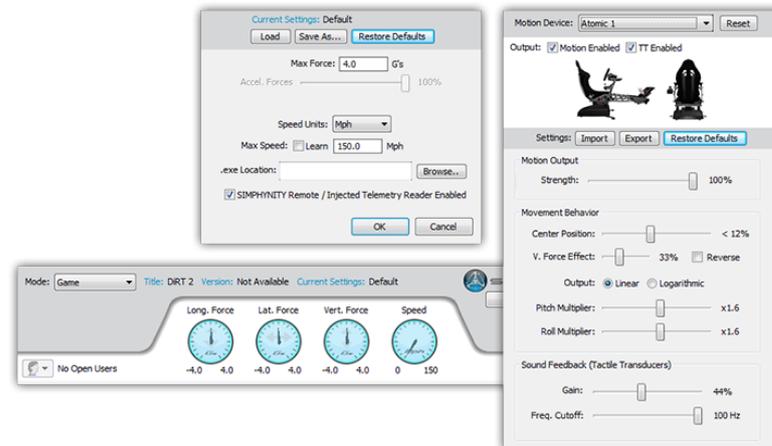


Figura 3.10: Il software di controllo della piattaforma Simphynity.

fase configurazione della stessa mediante Simphynity. Si è deciso di optare per il software X-Sim: si tratta di un software universale adatto a simulatori commerciali, ampiamente utilizzato e supportato dallo stesso Simphynity. X-Sim consiste di due software: X-Sim Extractor che si occupa della configurazione dell'applicazione/gioco e degli opportuni plugin di interfaccia tra l'applicazione/gioco e X-Sim e X-Sim Converter che gestisce la conversione dei dati di telemetria provenienti da Extractor in dati da inviare in output a Simphynity. Simphynity è compatibile con X-Sim tramite la “X-Sim Mode”: in questa modalità riceve da rete i dati provenienti da X-Sim e può, dunque, inviarli tramite interfaccia USB alla piattaforma. Tuttavia X-Sim, differentemente da Simphynity non è compatibile con Unity. Per poter permettere la comunicazione tra l'applicazione in Unity e X-Sim la soluzione adottata è consistita nell'utilizzare un plugin supportato da X-Sim come interfaccia per i dati di telemetria: in questa maniera X-Sim, sostanzialmente, riceve dei dati che va a gestire come se fossero dei dati provenienti da uno dei giochi da lui supportati. A tal proposito, si è utilizzato il plugin del simulatore di corsa “Live for Speed” [45]. Il plugin presenta un'interfaccia in cui riceve in input dati relativi a:

- tempo (il tempo misurato a partire dall'avvio dell'applicazione, rappresentato come valore intero);
- velocità angolare;
- orientamento;
- accelerazione;
- velocità;
- posizione.

È necessario, dunque, inviare al plugin tali dati da Unity. Si è utilizzato uno script analogo a quello che gestisce la compatibilità fra Simphynity e Unity, collegato al veicolo di interesse. Questo codice va a calcolare in Unity i dati richiesti dal plugin e li invia tramite rete ad X-Sim.



Figura 3.11: Il software X-Sim.

Da sottolineare il fatto che è stato necessario effettuare una conversione di sistemi di riferimento: infatti, Unity adotta un sistema di riferimento sinistrorso; per tale motivo si sono espressi i vettori in un sistema di coordinate destrorso, compatibile con il plugin di “Live for Speed”. È stato, dunque, possibile permettere la comunicazione tra Unity ed X-Sim e, quindi, inviare tramite l’interfaccia di rete aperta da Extractor i dati al Converter. Tramite quest’ultimo è possibile regolare parametri come, ad esempio, la violenza e l’inclinazione della piattaforma. In generale, l’utilizzo di X-Sim si è rivelato efficace perché ha permesso di controllare in maniera più fine la piattaforma, offrendo, complessivamente, un comportamento della stessa più soddisfacente rispetto a quello ottenuto tramite configurazione con Simphynty.

Inoltre, si è dovuto gestire il problema dovuto al fatto che, essendo la simulazione in realtà virtuale, l’headset riconosce come movimenti della testa i movimenti generati dalla piattaforma per simulare le forze agenti sul corpo dell’utente. Ad esempio, in fase di curva, la forza centrifuga spinge il corpo in direzione opposta a quella della curva; la piattaforma di movimento va a simulare questo comportamento inclinando il sedile in direzione opposta a quella della sterzata. Il sistema di realtà virtuale va, dunque, a riconoscere questa inclinazione come un movimento della testa e, pertanto, va ad elaborarlo come se si trattasse di un normale movimento dell’utente, il che è errato [46]. Il risultato visivo per l’utente sarebbe quello, in caso di curva, di trovarsi al di fuori del finestrino del veicolo, come mostrato in figura 3.12.

Per correggere questo comportamento si è utilizzato un tracker, riconosciuto dal sistema di tracciamento del Vive e che è stato montato sulla piattaforma, in posizione vicina all’headset. Dopo di che, si è utilizzato il plugin “OpenVR Input Emulator” [47] che effettua, a runtime, l’operazione di compensazione del moto, ovvero calcola la differenza tra i valori di velocità/accelerazione del tracker di riferimento e quelli relativi al visore. Questa operazione permette di eliminare i movimenti della piattaforma dal sistema di tracciamento del Vive, realizzando, dunque un’esperienza più immersiva ed autentica.



Figura 3.12: Compensazione del moto: prima e dopo.

3.7 Forza Motorsport Wheel Bundle

Dopo aver configurato la piattaforma, si è effettuata una fase iniziale di testing del controller fisico del veicolo, offerto di base da GENIVI. A tale scopo, si è integrato il simulatore con un kit di dispositivi di input tramite i quali interagire con l'auto. Il bundle, distribuito da Fanatec, è il Forza Motorsport Wheel, compatibile sia per PC che per Xbox, ed include:

- la ClubSport Wheel Base V2.5;
- il ClubSport Steering Wheel Universal Hub per Xbox One;
- il ClubSport Wheel Rim GT Forza Motorsport;
- i ClubSport Pedals V3;
- il ClubSport Shifter SQ V 1.5.

La base è il cuore del sistema ed ospita il pignone dello sterzo ma anche le interfacce per collegare gli altri dispositivi come il cambio e la pedaliera. Essa offre un elevato grado di precisione garantita da due sensori magnetici Hall, mentre il potente servo motore brushless, incredibilmente morbido, è in grado di generare un'accelerazione istantanea senza punti morti attorno al centro.

L'Universal Hub, compatibile con diversi volantini Fanatec, dà all'utilizzatore la possibilità di crearsi la sua postazione di guida con uno dei volantini supportati. Esso offre diversi tasti, completamente personalizzabili, che servono all'utente per muoversi nei menu della console e nelle fasi di configurazione iniziale del sistema. Vi è anche un display che indica la velocità in corsa e la marcia inserita. Inoltre, offre due tipi diversi di levette del cambio, più piccole, adatte a piccole corone, o più grandi e super regolabili.

Il ClubSport Wheel Rim GT Forza Motorsport è il volante, in grado, grazie alla base, di ruotare fino a 900° e di ritornare la forza all'utente (FFB). La corona, da 33 cm, è costituita di alluminio anodizzato, spazzolato e coperto da cuoio liscio con cucitura bianca.

La pedaliera ClubSport Pedals V3, comprensiva di acceleratore, freno e frizione è anch'essa dotata della tecnologia a sensori magnetici Hall Effect che garantisce

una lunga durata e massima performance. Essa è anche regolabile, senza utilizzare alcuno strumento esterno, in accordo allo stile di guida ed all’ergonomia.

Infine il ClubSport Shifter SQ V 1.5 è la leva del cambio marcia dotata del meccanismo di impostazione rapida per passare dal cambio tradizionale di tipo H a quello sequenziale, altamente realistico e con un feedback aptico molto forte.



Figura 3.13: Forza Motorsport Wheel Bundle.

3.8 Leap Motion

Poiché è stato dimostrato che l’utilizzo di avatar umani all’interno della realtà sintetizzata aumenta il senso di presenza nella stessa [48], allo stesso modo, avere la possibilità di vedere le proprie mani all’interno del mondo virtuale aumenta il realismo dell’esperienza. Pertanto, si è deciso di integrare la tecnologia Leap Motion all’interno della simulazione per permettere alla persona di percepire, in virtuale, le proprie mani. La tecnologia, sviluppata dall’omonima società, specializzata nella produzione di interfacce uomo-macchina si basa sull’utilizzo di un controller da collegare via USB ad un PC, per realizzare un’esperienza desktop oppure ad un visore, per realizzare un’esperienza in realtà virtuale, come nel caso dell’applicazione di tesi. Il controller dispone di due telecamere e tre LED infrarossi tramite cui osserva un’area a forma di piramide invertita, data dall’intersezione dei campi di vista delle camere, di circa 8 piedi cubi. In precedenza, il range di rilevazione della periferica era di 60 cm al di sopra del dispositivo. In seguito il range è stato esteso fino ad 80 cm, pur restando limitato dalla propagazione della luce infrarossa nello spazio. A questo punto, il controller USB del device legge i dati acquisiti dai sensori, li salva in una memoria locale, realizza le opportune regolazioni di risoluzione ed invia i dati via USB al software di tracciamento del Leap. I dati sono interpretati come immagini stereoscopiche in scala di grigi, dello spettro vicino all’infrarosso, separatamente per camera sinistra e destra. Una volta che le immagini sono inviate al PC tramite interfaccia USB, vengono effettuate complesse elaborazioni matematiche, in pratica algoritmi avanzati applicati direttamente ai dati grezzi provenienti dal sensore. Le immagini sono analizzate dal Leap Motion Service, software a bordo del PC, per ricostruire una rappresentazione tridimensionale di quello che vede il dispositivo.

Quindi, il livello che si occupa del tracking estrae l'informazione tracciata, come le dita o altri oggetti e tutti i dati vengono inviati come serie di frame in un protocollo di trasporto. Attraverso questo protocollo, il servizio comunica con il Leap Motion Control Panel e con delle librerie native e web tramite una connessione locale su socket con TCP per le prime e tramite WebSocket per le ultime. La libreria client organizza i dati in una struttura API orientata ad oggetti, gestisce la cronologia dei frame e fornisce delle funzioni di help e delle classi. Dunque, la logica dell'applicazione si collega al livello di input realizzando l'esperienza interattiva tramite motion-control.

È dimostrato dallo studio di Weichert et al. [49], che l'accuratezza complessiva del controller è di 0.7 mm.



(a) Visione in VR dell'utente.



(b) Visione dall'esterno.

Figura 3.14: Leap Motion in configurazione VR.

Capitolo 4

Progettazione e realizzazione

Si è, dunque, indirizzato il lavoro verso la realizzazione e configurazione del veicolo da usare nell'applicazione di tesi. In seguito, si è andati ad effettuare la progettazione degli scenari in cui andare a testare l'esperienza di guida autonoma e la progettazione e realizzazione dell'interfaccia utente.

4.1 Creazione e configurazione del veicolo

Il simulatore offre due esempi di veicoli già configurati per essere utilizzati in guida manuale: la Jaguar XE e la Range Rover L405, entrambe fornite di controller di guida, progettato per seguire le leggi della fisica; si è deciso, quindi, di partire da tali veicoli come base per le attività della tesi. L'applicazione intende offrire all'utente un'esperienza di guida autonoma, pertanto, si è optato per una Tesla Model S. La scelta è stata motivata dal fatto che al momento attuale la Tesla risulta il brand che ha mostrato il maggior numero di funzionalità di assistenza al conducente, configurandosi come una di quelle maggiormente automatizzate (si tratta di un veicolo di livello 2 secondo la definizione del SAE). Essa offre un livello di automazione parziale per mezzo dell'Autopilot, ovvero il software di gestione delle funzionalità di guida assistita: è, infatti, in grado di gestire velocità e sterzata in certe condizioni, come la guida su strada extraurbane. Ad ogni modo il guidatore deve comunque mantenere attenzione al contesto stradale e prendere immediatamente il controllo del veicolo qualora le condizioni di guida eccedano le capacità di gestione del sistema.

4.1.1 Modellazione e texturizzazione del veicolo

La funzionalità ritenuta utile di entrambi i veicoli presenti è stato il controller di guida. I modelli non erano riciclabili in quanto riferiti a veicoli diversi e non essendo l'obiettivo quello di realizzare un'esperienza in prima persona. Perciò, si è dovuto procedere ad ottenere un modello tridimensionale della Tesla Model S, che includesse anche gli interni. La presenza degli interni era importante perché l'interesse era quello di permettere al guidatore di visionare anche ciò che si trova dentro la

vettura, come il cruscotto o il pannello centrale della Tesla, in modo da offrire una visione di tipo “Cockpit View” e non in prima o terza persona. Questo è giustificato anche dal fatto che il senso di realismo e presenza e del conducente all’interno del veicolo sono incrementati quando questi percepisce di trovarsi effettivamente all’interno del veicolo, cosa non offerta dagli altri due tipi di configurazioni [43, 48]. Dunque, la ricerca è stata orientata verso dei modelli tridimensionali della Tesla. Molti di questi presentavano, per lo più, soltanto gli esterni. Il simulatore di guida Assetto Corsa, sviluppato da Kunos Simulazioni, offriva, per contro, un modello di ottimo livello del veicolo, estremamente curato in tutti i dettagli, esterni ed interni compresi, ma al prezzo di un numero eccessivo di poligoni, che potevano potenzialmente impattare sulla fluidità dell’esperienza in realtà virtuale. Il gioco offriva anche un modello a poligoni ridotti, ma la riduzione, in realtà, era dovuta al fatto che venivano scartati gli interni. Vista, comunque, la notevole qualità dell’asset reperito si è, inizialmente, deciso di utilizzare questo come base per il veicolo. Nonostante la ritopologizzazione, volta a ridurre il numero di poligoni e l’eliminazione di alcune parti del modello che, non essendo visibili, era inutile includere nella pipeline di rendering di Unity, ci si è resi conto nel prosieguo dell’implementazione dell’applicazione che il modello impattava significativamente sul frame rate a causa dell’eccessivo numero di poligoni. Si è, dunque, cercato un modello più leggero in termini di poligoni. In particolare si è considerato un modello, disponibile in formato `.dff`, creato allo scopo di personalizzare il videogioco GTA V con l’introduzione di ulteriori veicoli rispetto a quelli previsti di norma. È stato possibile importare il modello in Blender tramite un importer da installare nel software come Add-on. Si è, dunque, proceduto a texturizzare il modello tramite Substance Painter, che permette grazie alla notevole qualità dei materiali offerti, di ottenere una resa molto realistica degli oggetti. Una volta texturizzato l’asset all’interno di Substance, è necessario applicare il materiale, visionabile in preview all’interno del medesimo software, su Unity. Per farlo è possibile sfruttare il preset di esportazione su Unity presente all’interno dello stesso programma di texturizzazione. In particolare, il workflow PBR più comune ovvero il *Metallic/Roughness*, richiede che affinché l’utente possa specificare completamente un materiale, deve applicare sul modello un certo numero di mappe. Quelle fondamentali sono la mappa di tipo *base colour* che contiene l’informazione di colore diffuso per i non-metalli ed il colore speculare per i metalli, la mappa di tipo *metallic* che è un’immagine in scala di grigi che comunica allo shader quali sono i poligoni del modello da considerare come metalli (il bianco indica che si tratta di un metallo) e la mappa di tipo *roughness*, la cui intensità dei valori va ad indicare una superficie più o meno ruvida. A queste mappe se ne aggiungono altre che contribuiscono ad offrire realismo alla resa finale del modello e sono, ad esempio, la mappa di tipo *normal* che simula la complessità del rilievo di una superficie evitando di modellarla, la mappa di *ambient occlusion* che tiene in considerazione l’attenuazione luminosa in prossimità di volumi occlusi oppure la mappa di tipo *emissive* che va a modellare un effetto di tipo *glow*, proprio di corpi che emettono luce. Quindi, tramite l’exporter di Substance si esportano tali mappe che vanno, poi, ad essere importate in Unity. Quindi, si esporta il modello, tramite l’exporter di Blender in un formato compatibile con Unity, in questo caso `.fbx`, e lo si ivi importa. L’applicazione del materiale sull’oggetto avviene, fornendo in input allo Standard Shader, ovvero il programma che descrive l’interazione della luce con

l'oggetto, compatibile con la tecnica PBR, le mappe di cui sopra.

Per incrementare il senso di presenza dell'utente nel veicolo e per aumentare il realismo dell'esperienza si è abilitata la visione di ciò che si trova dietro ed ai lati del veicolo tramite gli specchietti retrovisori. Questi sono stati realizzati utilizzando quella che in Unity si chiama Render Texture ovvero una texture creata ed aggiornata a runtime. Per utilizzarla si crea una Render Texture tramite l'apposito comando di istanziamento e si crea una camera che va a renderizzare la porzione del mondo opportuna. In questo caso si crea una camera orientata in maniera opposta al veicolo, che va ad inquadrarne il retro ed i lati. Quindi, si assegna la Render Texture, che a questo punto ha come contenuto la scena inquadrata dalla camera ad un qualunque materiale, a sua volta applicabile ad un oggetto. Una volta ultimata la creazione delle tre Render Texture, sono stati definiti tre materiali che sono stati assegnati alle geometrie degli specchietti della Tesla.

Proseguendo, si è gestita la creazione e configurazione del volante virtuale. È risultato necessario, dunque, disporre di un modello tridimensionale del volante, che non fosse quello della Tesla, visto che il bundle che si è acquistato include il volante ClubSport GT Forza Motorsport. Non avendo trovato alcuna base da cui partire o un modello già realizzato del volante di interesse, si è proceduto a modellarlo in Blender, tramite la nota tecnica dei *blueprint* ossia la disposizione di immagini di riferimento, in diverse viste all'interno del software, che sono poi sfruttate come guida per la definizione della geometria. Una volta modellato il volante, come per la Tesla si è importato l'asset all'interno del software di painting, Substance, per texturizzarlo. Quindi sono state importate le mappe PBR ed il modello in Unity, è stato creato un materiale con tali texture ed applicato quest'ultimo all'oggetto per ottenere l'asset finale.

Per quanto riguarda la rotazione del volante, la si è calcolata sulla base dell'input di sterzata dato dall'utente. Dunque, il valore di rotazione, moltiplicato per un valore pari a 443° , ovvero circa metà del massimo angolo di sterzata del volante, è stato applicato al sistema di riferimento solidale all'oggetto stesso, in modo da farlo ruotare secondo gli assi coordinati locali.

4.1.2 Configurazione del controller del veicolo

A questo punto il modello della Tesla risulta completo dal punto di vista della resa grafica, pertanto, si è proceduto a rendere operativo il veicolo all'interno dell'applicazione, ovvero a far sì che essa si comportasse effettivamente come un corpo rigido, soggetto alle leggi della fisica e che fosse guidabile dall'utente. Per farlo si è applicato all'asset il controller di guida già presente sui due esempi di auto fornite di default da GENIVI. Questo include il componente *Rigidbody* che su Unity viene applicato ad un oggetto quando si vuole rendere il suo movimento soggetto al controllo del motore fisico. Il corpo risulta sottoposto alla forza di gravità e reagisce alle collisioni con gli elementi vicini, a patto che sia presente un Collider ossia una rappresentazione semplificata della geometria dell'oggetto, utilizzata allo scopo di registrare gli impatti con gli altri elementi presenti nell'ambiente.

La configurazione di un controller di guida per un veicolo è una procedura abbastanza standard, che viene adottata dalla maggior parte dei pacchetti di simulazione

offerti su Unity e prevede l'applicazione di un *Collider* al body del veicolo che serve per registrare gli urti col resto dell'ambiente e di 4 *WheelCollider* che sono *Collider*, specificamente progettati per veicoli a ruote. Essi vanno a modellare la fisica della ruota ed altri parametri fisici come le sospensioni pneumatiche e l'attrito pneumatici-asfalto. È inoltre possibile impostare quali ruote siano sterzanti ed abbiano trazione. In seguito, è opportuno settare la massa del veicolo nel *Rigidbody*: la si è impostata a 2120 kg ed il centro di massa all'interno del controller, che è stato collocato al di sotto dei sedili anteriori, circa a metà della lunghezza della vettura.

Il veicolo è già reso guidabile grazie al controller, quindi, una volta configurato, questo è pronto per essere comandato manualmente dall'utente il quale può fornire l'input tramite tastiera. La guida avviene impostando i parametri di trazione e di sterzata delle 4 ruote in base all'input dell'utente. I parametri sono calcolati come la moltiplicazione della massima trazione impostata, per l'input dell'utente, in caso di accelerazione o frenata oppure come il prodotto del massimo angolo di sterzata, sempre per l'input dell'utente, in fase di sterzata. In più, il controller del veicolo presenta dei parametri aggiuntivi, come quelli che modellano il cambio di velocità, di default automatico in GENIVI. Tramite tali parametri è possibile impostare il numero di marce totali, la rapportatura di cambiata, il ritardo di innesto della marcia e la tenuta della marcia. Vi sono anche alcuni che permettono di impostare il numero minimo e massimo di RPM. I veicoli di default di GENIVI possiedono anche una logica di gestione dell'audio che permette di modellare il carico e lo scarico del motore, di simulare l'urto con altri oggetti, il rumore del vento e della pavimentazione stradale e l'accensione del veicolo. Questi ultimi componenti insieme ai parametri che regolano il cambio di velocità e gli RPM sono pensati per dei veicoli a motore termico, con cambio automatico. Nel caso dell'applicazione di tesi si sta facendo uso di un veicolo elettrico con un sola marcia, quindi la logica di gestione dell'audio, del cambio e degli RPM non è propriamente la stessa di una vettura a motore. Tuttavia, l'obiettivo della tesi non riguarda la simulazione del comportamento di un veicolo elettrico quanto, piuttosto, la valutazione delle informazioni mostrate dall'interfaccia dell'auto autonoma. Pertanto, si è deciso di non soffermarsi sulla modellazione dell'audio per un veicolo elettrico e di lasciare inalterata la logica di gestione dei rapporti e degli RPM.

4.2 La guida autonoma

Dopo aver preparato il veicolo dal punto di vista grafico e averlo reso operativo nell'ambiente grazie al controller fisico, si è andati a considerare l'aspetto della guida autonoma. Quest'ultima si rivela un componente fondamentale all'interno dell'esperienza. L'auto infatti, rappresenta il primo elemento con cui l'utente va a confrontarsi nel corso della simulazione. È importante, pertanto, stabilire sin da subito un rapporto di fiducia tra utente e veicolo, per mezzo dell'esperienza di guida. Sulla base degli studi di Muir & Moray [50] tale rapporto di fiducia è influenzato dalla percezione dell'utente di come l'auto si comporta alla guida. Inoltre, secondo Lee & Moray [51] un sistema automatico che commette errori, riduce bruscamente la fiducia dell'operatore. Per tale ragione è opportuno avere una guida che non sembri robotica ma che si mostri più simile alla guida umana e che non commetta

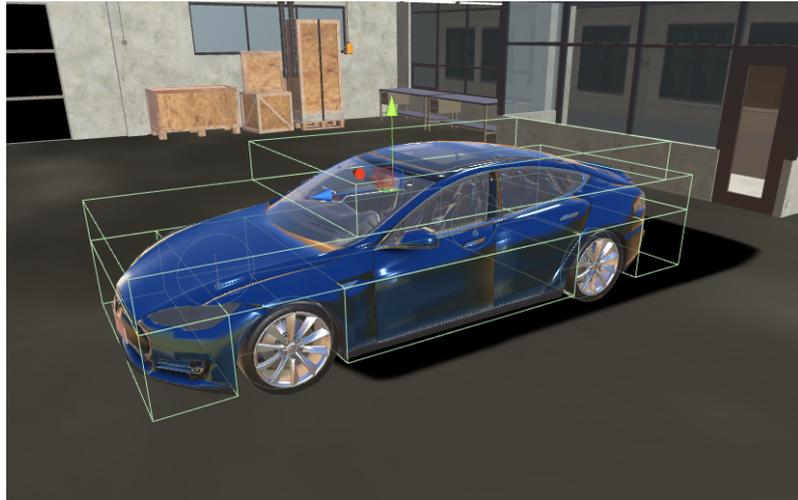


Figura 4.1: Tesla configurata su Unity.

errori. In questo modo, si stabilisce un iniziale rapporto di fiducia tra l'utente ed il sistema robotico ed è possibile andare, quindi, a fare le ulteriori valutazioni riguardo l'interfaccia dell'auto. Si è, dunque, proceduto a progettare e realizzare l'algoritmo che gestisce la guida autonoma. Per approfondimenti a riguardo si rimanda al lavoro di tesi del collega A. Laurino [52].

4.3 Progettazione degli scenari di guida

In merito alla scelta degli scenari di guida, si ricorda che GENIVI offre la presenza di tre scenari già modellati e texturizzati. Di questi, si è deciso di considerare ai fini dell'applicazione lo scenario extraurbano ambientato nella Pacific Coast Highway e lo scenario urbano che offre una versione in miniatura della città di San Francisco. La scelta è stata motivata dal fatto che essi rappresentavano due tipici scenari di guida differenti, che potevano andare a stimolare due diversi tipi di guida: quella in extraurbano, più continua, che prevede una velocità di crociera maggiore e soggetta a variazioni di pendenza e quella in urbano, meno continua in quanto soggetta ai diversi cambi di velocità che il contesto stradale pone, ad esempio, per la segnaletica e che prevede una velocità di marcia inferiore. Il fatto di mostrare che l'auto fosse in grado di affrontare diverse situazioni di guida in modo da creare un rapporto di fiducia tra l'utente e la macchina è stato evidenziato dallo studio di Lee & Moray [51].

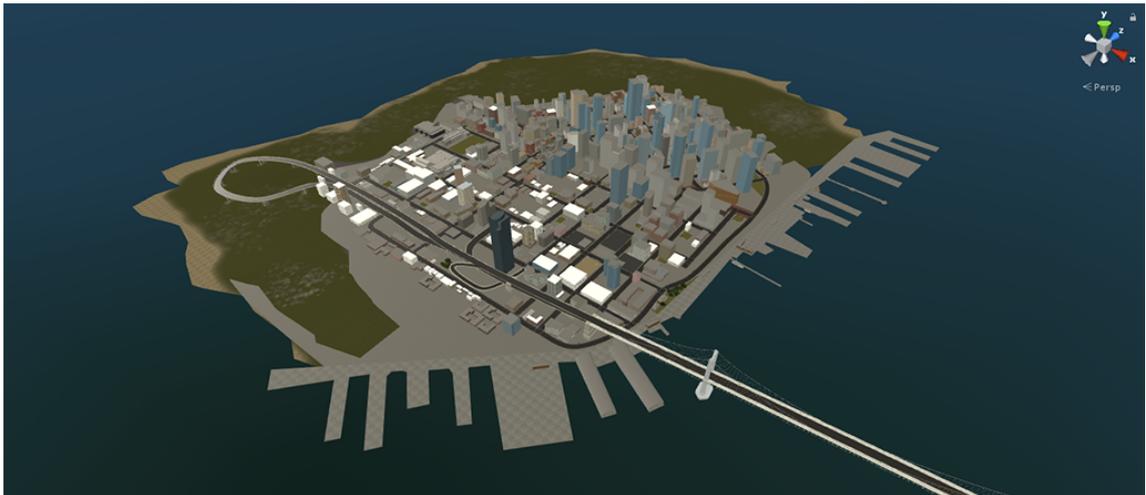
Una volta individuati gli scenari, si è proceduto ad introdurre negli stessi delle specifiche situazioni di guida. Tali situazioni sono state inserite per mettere l'utente in condizione di capire se potersi fidare o meno dell'auto. Quest'ultima mostra all'utente le sue capacità decisionali tramite le azioni di guida intraprese e tramite l'interfaccia che visualizza l'interpretazione della situazione di guida corrente. Si è deciso di inserire nell'ambiente urbano ed extraurbano delle situazioni più pericolose, in cui l'auto dimostra di saper valutare i rischi e prendere misure adeguate per salvaguardare il passeggero ed altre più ordinarie, che potrebbero capitare in un qualunque viaggio a bordo di un'auto autonoma; in queste ultime l'auto va a

mostrare la sua capacità di saper gestire l'ambiente in cui si trova, che sia urbano o extraurbano, prendendo in considerazione i segnali stradali, fermandosi ai semafori quando necessario, adeguando la velocità a quella dei veicoli che precedono, effettuando dei sorpassi in presenza di veicoli di intralcio alla circolazione perché troppo lenti o seguire le regole di precedenza agli incroci.

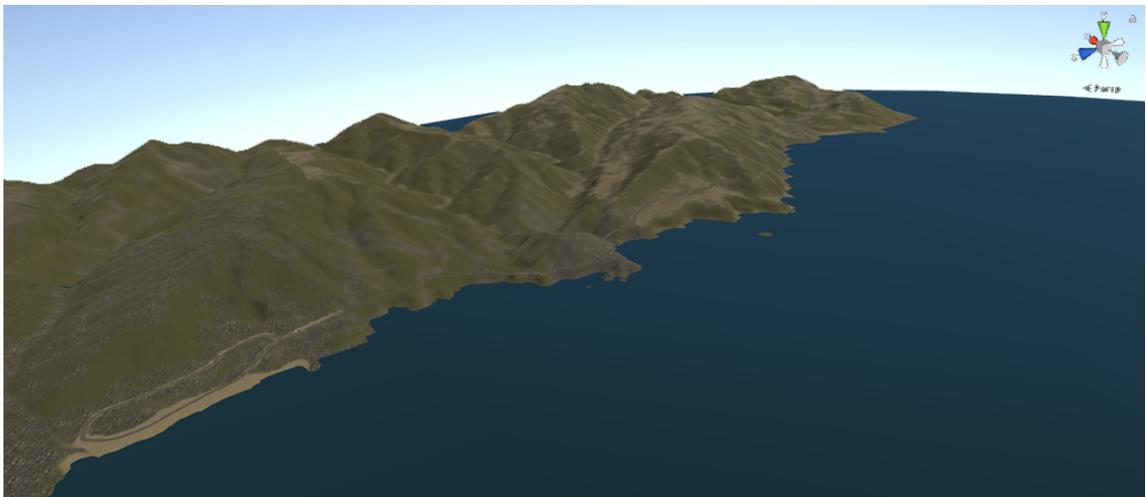
Partendo dal considerare l'ambiente urbano si è deciso di introdurre situazioni pericolose come l'attraversamento improvviso di un cane, di un pedone e di un veicolo a velocità sostenuta in corrispondenza di un incrocio; inoltre, si è considerata una situazione in cui una palla viene gettata in strada da un bambino e quest'ultimo la insegue; questa circostanza è spesso menzionata nell'ambito della questione morale posta dalle auto a guida autonoma per mostrare il problema della difficoltà di programmare una decisione delicata su chi salvare fra il bambino stesso ed un altro elemento attivo in strada. Per quanto riguarda le situazioni di guida ordinaria si è deciso di inserire attraversamenti pedonali in corrispondenza di un semaforo ed in corrispondenza di un segnale di stop, dei tagli di strada, e situazioni in cui si mostra la capacità dell'auto di prendere in carico i semafori e i veicoli che precedono, accelerando o decelerando all'occorrenza. La durata dello scenario urbano è stata impostata a 12 minuti. La sua lunghezza è giustificata dal fatto che in una fase iniziale, l'utente prende confidenza col mezzo autonomo; per questo motivo, l'esperienza inizia in una zona poco trafficata ed in cui non ci sono molti elementi all'interno dell'ambiente: l'utente può, dunque, iniziare a valutare i comportamenti dell'auto e stabilire se poter instaurare un rapporto di fiducia con questa. In seguito, l'ambiente comincia a popolarsi di veicoli e pedoni, pertanto compaiono delle informazioni di contesto stradale: in questo modo l'utente può familiarizzare con il display ovvero rendersi conto di quali sono gli oggetti che questo porta all'attenzione ed in che maniera decide di rappresentare l'informazione. Proseguendo, si introducono nello scenario le situazioni di pericolo in cui l'auto mostra le sue capacità decisionali e le comunica all'utente tramite l'informazione. La simulazione prosegue, alternando delle situazioni rischiose ad alcune ordinarie, in modo da mostrare all'utente in che modo l'auto affronta un tipico contesto urbano, continuando a mostrare informazione.

Relativamente allo scenario extraurbano si è, anche qui, incluso circostanze pericolose come l'attraversamento improvviso di un cervo, una strada con dei massi a terra in corrispondenza di una zona con limitata visibilità ed un sorpasso con invasione della corsia opposta di marcia. Le situazioni di guida più consuete, invece, si riferivano a rispetto dei limiti di velocità ed adeguamento della velocità in presenza di un veicolo lento ed in curva. La durata di questo scenario è di circa 6 minuti. In questo caso si è rivelata la lunghezza adeguata: esso, infatti non si presta molto alla creazione di circostanze di varia tipologia e tende a risultare monotono e ripetitivo; gli elementi presenti in tale contesto, sono essenzialmente altri veicoli del traffico, ed eventualmente degli animali, inoltre il tipo di percorso non presenta incroci o punti di svolta, per cui risulta difficile creare ulteriori situazioni di guida che risultino credibili.

Per approfondimenti riguardo la realizzazione delle situazioni di guida si rimanda al lavoro di tesi del collega A. Laurino [52].



(a) San Francisco.



(b) Pacific Coast Highway.

Figura 4.2: Scenari di guida utilizzati nell'applicazione.

4.4 Progettazione dell'HUD omnicomprensivo

Una volta predisposto il veicolo per la guida autonoma e preparato degli scenario di test, ci si è occupati della parte di progettazione e realizzazione dell'interfaccia dell'auto autonoma. In particolare, si è proceduto ad effettuare una prima fase di valutazione delle informazioni da mostrare sul display ed, in seguito, a preparare una variante omnicomprensiva ed una selettiva del display.

Secondo l'opinione di ABI Research, una possibilità di dimostrare che l'auto è in grado di comprendere e reagire al mondo reale è tramite degli HUD che proiettino le informazioni in realtà aumentata [42]. Inoltre, gli AR-HUD offrono una serie di vantaggi, sulla base di quanto dimostrato dagli studi in ambito manuale per quanto riguarda i tempi di reazione più brevi e la capacità di mantenere attenzione al contesto stradale più facilmente. Pertanto si candidano ad essere i display ideali per mostrare delle informazioni all'utente.

Proponendosi, dunque, di mostrare all'utente informazioni tramite tale display

si è, innanzitutto, cercato se ci fossero degli AR-HUD commercializzati e cosa questi decidessero di mostrare al guidatore. In realtà, come anticipato dallo stesso Bonte di ABI Research [42], la tecnologia di realizzazione del dispositivo è complessa, in quanto richiede di proiettare con un elevato livello di precisione delle informazioni tridimensionali sul parabrezza e, per poter creare delle immagini prive di distorsioni, le immagini ottenute dallo specchio concavo dell'HUD devono essere molto precise. Di conseguenza si richiedono tolleranze molto strette. Inoltre per presentare un'immagine che sia leggibile, è opportuno disporre di molta luminosità. Vi sono, dunque, delle sfide tecnologiche che rallentano la penetrazione di questi display sul mercato [53].

Ciò che si trova nel panorama commerciale riguarda, quindi, per lo più dei concept che le diverse aziende attive in ambito automotive e non, propongono in attesa che si riescano a superare le limitazioni tecniche oppure degli HUD che rappresentano le informazioni in maniera non conforme alla posizione degli oggetti nell'ambiente. Questi ultimi hanno, però, trovato scarsa applicazione nella letteratura riguardo la progettazione di un'interfaccia per veicoli autonomi che mostri informazioni di contesto stradale, quindi si è deciso di non considerarli. Dunque, si sono esaminate prima le proposte commerciali, seppur prototipali di AR-HUD. Queste, difatti, si rivelano utili perché consentono di analizzare la tipologia di informazioni che decidono di mostrare al guidatore. In particolare, la ricerca ha rivolto l'interesse verso le seguenti proposte di AR-HUD:

- Il concept di AR-HUD di Continental;
- Il concept di AR-HUD proposto da Daqri;
- Il concept di AR-HUD di Hyundai;
- Il concept di AR-HUD del gruppo PSA;
- Il concept di display olografico in AR di WayRay;
- Il video dimostrativo di Google Waymo;
- Il video dimostrativo per la promozione della NVIDIA Self Driving Vehicle Platform.

Le proposte di cui sopra fanno riferimento a concept di HUD in realtà aumentata concepiti per essere utilizzati in auto semiautomatiche, quindi come delle possibili estensioni dei sistemi di assistenza alla guida. Waymo, invece, che decide di saltare i livelli di automazione intermedia per puntare al livello 4 direttamente, nel suo video di presentazione dell'auto autonoma propone una visualizzazione che è utile all'osservatore per mostrare le capacità del mezzo autonomo. Analogamente, anche NVIDIA nel video dimostrativo delle capacità della sua piattaforma di intelligenza artificiale, in grado di poter offrire il livello 5 di autonomia, propone una visualizzazione dimostrativa delle capacità di rilevazione dell'automobile e delle sue funzionalità. Si riassumono in 4.1 le informazioni che ciascuna visualizzazione mostra all'utente:

AR-HUD

Informazioni



LDWS, Navigazione assistita, ACC

Figura 4.3: Continental.



Navigazione assistita, LKA, Lane Control (Controllo del senso di marcia), ACC, Avviso di ostacolo in avvicinamento, Zona attraversata da bambini, Rilevamento pedoni

Figura 4.4: Daqri.



Semafori, Navigazione Assistita, LKA, ACC

Figura 4.5: Hyundai.



Navigazione Assistita, LKA, ACC, Rilevamento pedoni, Avviso di ostacolo in avvicinamento

Figura 4.6: PSA.



Navigazione assistita

Figura 4.7: Wayray.



Semafori, veicoli, pedoni, ciclisti con relativa distanza e velocità, Predizione del moto degli oggetti, Navigazione Assistita

Figura 4.8: Waymo.



Semafori, veicoli, segnaletica stradale, strisce di margine, pedoni, ciclisti, distanza, spazio libero, pianificazione del moto, stima della propria posizione

Figura 4.9: NVIDIA.

Tabella 4.1: AR-HUD ed informazioni visualizzate.

Quello che si nota, osservando le informazioni presenti in figura 4.1 è che vi è una tendenza, anche per quanto riguarda la scelta di rappresentazione grafica da parte dei produttori auto di mostrare un set di simboli comuni. In particolare, si tratta di informazioni di assistenza alla guida quali l'ACC ed il LKA condivise da Continental, PSA, Hyundai e Daqri. Questo può essere giustificato dal fatto che i sistemi di supporto al guidatore commercializzati oggi includono tali funzionalità che, pertanto, sono mostrate nell'HUD. WayRay, si discosta dal gruppo di cui sopra perché decide di mostrare, per lo meno sulla base dei pochi video dimostrativi disponibili, soltanto delle informazioni di navigazione per il conducente, magari rappresentate graficamente in più alternative, ma comunque limitate a questa funzionalità. In effetti, il display olografico promosso dalla società di sviluppo svizzera di realtà aumentata, si dichiara, come un "navigation system", dal che la limitatezza nella tipologia di informazioni visualizzate.

Waymo ed NVIDIA, che puntano, invece, ad obiettivi diversi nella progettazione delle auto autonome, saltando l'automatizzazione intermedia, offrono una visualizzazione delle informazioni più omnicomprendensiva. Infatti, dimostrano come l'auto, tramite i sensori a bordo della vettura, sia in grado di riconoscere tutti gli elementi coinvolti nel contesto di guida: veicoli, pedoni, ciclisti, semafori, segnali stradali ecc. dei quali sono anche fornite, da Waymo, sia l'informazione di distanza che quella di velocità mentre da NVIDIA quella di distanza. In più si aggiungono informazioni di navigazione proprie, ossia associate al veicolo stesso, ma anche non proprie, cioè relative agli altri veicoli, pedoni o ciclisti di cui è calcolata la predizione di moto. NVIDIA mostra anche la capacità di rilevazione dello spazio libero, il riconoscimento delle linee di separazione delle corsie e informazioni sulla pianificazione del percorso come la capacità di seguire la corsia, intercettare i cambi di corsia e le curve pericolose.

Questo riguarda ciò che i grandi player tecnologici e le case automobilistiche hanno proposto. Per quanto riguarda la letteratura è possibile citare, ad esempio, l'interfaccia proposta da Lungaro et al. [41] che propone una visualizzazione in realtà aumentata che mostri potenziali ostacoli nella scena, come pedoni o altri veicoli.

Sulla base di quanto proposto dal mercato e, seppur in maniera minore, di quanto mostrato dallo studio in letteratura considerato, è stato possibile andare a formulare un insieme di informazioni da mostrare al guidatore. Le informazioni che si è scelto di visualizzare sull'HUD sono:

- elementi statici e dinamici all'interno dell'ambiente;
- informazione di velocità, distanza e pericolosità di tali elementi;
- semafori e segnaletica stradale;
- linea di navigazione propria e degli altri veicoli come informazione di pianificazione del percorso stradale;
- linea di mezzeria.

L'approccio considerato presenta punti in comune con i display proposti dalle case produttrici. Infatti, decide, ad esempio, di andare a fornire informazioni non solo sugli altri veicoli ma anche relative ad altri elementi presenti nel contesto di guida come i pedoni oppure associate alla pericolosità di tali elementi; tuttavia, esso risulta più simile alla proposta dei player tecnologici, in quanto punta a dare delle informazioni in maniera omnicomprendensiva che siano in grado di mostrare al passeggero come l'auto autonoma, sia in grado di osservare e comprendere l'ambiente circostante, rilevando gli elementi presenti, identificandoli e mostrandosi capace di decidere autonomamente il percorso da seguire. Per contro, la tipologia di informazioni fornite dagli AR-HUD dei produttori auto è, come già menzionato sopra, per lo più rivolta ad auto semiautomatiche. Nel caso del lavoro di tesi, si sta un'auto che secondo la classificazione del SAE è più vicina al livello 4 o 5 di autonomia, pertanto, l'insieme di informazioni presentato da Waymo ed NVIDIA è risultato più appropriato.

Dunque, come elencato precedentemente, l'auto può mostrare delle informazioni relative a tutti gli oggetti presenti nell'ambiente, statici come alberi, rocce, pali di illuminazione, auto parcheggiate ecc. e dinamici come pedoni, animali o altri veicoli. Di tali elementi è fornita l'informazione di distanza, espressa in metri, dall'auto autonoma, di velocità assoluta, quando presente, in chilometri orari e la relativa pericolosità. Inoltre, l'auto fornisce anche un'informazione di identificazione per ciascun elemento, in modo che l'utente si renda conto che essa riconosce ciò che popola l'ambiente. Proseguendo, si possono mostrare informazioni circa la segnaletica stradale, della quale è fornita l'informazione di distanza e circa i semafori dei quali è identificato lo stato. Come per gli altri oggetti l'auto identifica il tipo di segnale o lo stato del semaforo e lo mostra all'utente prendendo, in seguito, decisioni opportune, come ad esempio arrestarsi in caso di segnale di stop o luce rossa semaforica. Ancora, l'auto mostra all'utente che essa è in grado di comprendere il percorso stradale proprio, tramite un'informazione sotto forma di linea di navigazione e mostra anche la traiettoria acquisita dalle auto che circolano sulla strada in quel momento, tramite lo stesso tipo di rappresentazione. Inoltre, l'informazione riguardo l'identificazione della linea di separazione del senso di marcia offre all'utente una ulteriore conoscenza circa la capacità dell'auto di comprendere il tratto stradale su cui sta procedendo, identificando il senso di percorrenza della corsia e la relativa posizione sulla corsia.

Il fatto di comunicare all'utente le informazioni di cui sopra, gli fornisce un feedback tramite il quale egli si costruisce un modello mentale che gli permette di comprendere le intenzioni e le decisioni dell'auto, come suggerito da Ekman et al. [3]. In questo modo l'utente incrementa la propria consapevolezza situazionale e, di conseguenza, la fiducia nell'auto [24]. Inoltre, l'auto si mostra all'utente come un sistema competente visto che dimostra di saper monitorare l'ambiente nella sua totalità e dimostra, tramite l'informazione mostrata dall'HMI, di saper gestire varie situazioni di guida come, ad esempio, rispettare i semafori, prendere in considerazione i pericoli frenando o evitandoli o fermarsi ad un segnale di stop. Il fatto che un sistema si mostri competente all'utente contribuisce alla formazione della fiducia secondo Ekman. et al. [3].

In generale, l'insieme di informazioni selezionate si presta alla realizzazione della variante di display omnicomprendivo, visto che va a fornire una considerevole quantità di informazioni relative alla situazione di guida. In particolare, in questa alternativa si è deciso di mostrare informazioni riguardo tutti gli elementi dinamici, all'interno di un diametro di "rilevazione" (di fatto la rilevazione è simulata andando ad escludere gli oggetti al di fuori del diametro di interesse) pari a 150 m. Tale scelta è giustificata dal fatto che un'auto autonoma di livello 4 o 5 è dotata del sistema LiDAR che ha lo scopo generare una mappa tridimensionale ad altissima risoluzione a 360° dell'ambiente circostante. La distanza di 150 m è sembrata appropriata sia in termini del numero di oggetti rilevati per frame, sia per il fatto che gli oggetti che si trovavano oltre tale distanza erano troppo lontani per poter essere apprezzati, quindi era inutile tracciarli. Tra l'altro, considerando le soluzioni implementative attuali, si può citare, ad esempio, Waymo che sostiene che il suo sistema LiDAR abbia una capacità di rilevazione di oggetti fino a tre campi di calcio; spingersi, dunque, oltre i 250 m sarebbe stato incoerente.

Dunque, di tutti gli elementi catturati nel raggio d'azione della sfera sono stati considerati i veicoli in movimento con le rispettive traiettorie ed altri elementi dinamici come pedoni o eventuali animali. Poi, si è deciso di mostrare anche l'informazione relativa alla pianificazione del percorso dell'auto e relativa alla linea di mezzzeria. Ancora, si sono incluse anche le informazioni riguardanti la segnaletica stradale e semaforica "rilevata" e riferita all'auto. Sono stati, quindi, scartati i cartelli stradali e semafori che regolassero tratti di strada diversi da quello dell'auto. Inoltre, si è deciso di escludere dalla visualizzazione le informazioni relative ad oggetti statici dell'ambiente come alberi, auto parcheggiate, pali di illuminazione ecc.. Da notare che l'informazione relativa agli oggetti statici viene comunque mostrata nel momento in cui questi diventano pericolosi. La ragione dell'esclusione degli elementi appena citati è dovuta al fatto che l'interfaccia risultante avrebbe violato il principio del carico cognitivo secondo cui un'HMI debba risultare facilmente comprensibile dall'utente, semplice ed intuitiva [54]. Al contrario, l'interfaccia si sarebbe rivelata difficoltosa da comprendere per l'utente, in quanto poco ordinata e confusionaria.

4.5 Progettazione dell'HUD selettivo

Per quanto riguarda la variante selettiva, si è andato ad effettuare uno studio di quali potessero essere le informazioni di effettivo interesse per l'utente durante una sessione di guida autonoma. In particolare, il principio che ha guidato la discriminazione delle informazioni ritenute prioritarie da quelle ritenute meno importanti è stato lo scegliere le informazioni relative agli elementi dell'ambiente, che in un certo istante di tempo andavano ad influenzare la guida dell'auto. Considerando il caso della segnaletica stradale, l'auto "rileva" all'interno del diametro di interesse un certo insieme di cartelli stradali, ma di fatto, solo alcuni di questi vanno a modificare il suo comportamento di guida; ad esempio, in presenza di un segnale relativo a dare precedenza ai pedoni per l'attraversamento dell'incrocio e di un segnale di limite di velocità, l'auto può decidere di non mostrare alcuna informazione sul primo segnale, sulla base del fatto che in quel momento non vi è nessun pedone, e di mostrare, per contro, un'informazione sul secondo segnale, perché questo sta determinando una modifica del suo comportamento di guida: l'auto reagisce, infatti, a tale segnale, riducendo la propria velocità. Pertanto, l'informazione che si è deciso di mostrare è relativa ad elementi del contesto stradale che condizionano la guida in un certo momento, quindi, potenziali pericoli nell'ambiente, un veicolo del traffico che interseca la propria traiettoria con quella dell'auto, un segnale stradale preso in considerazione dall'auto oppure il veicolo che precede in quanto soggetto a maggior attenzione fra quelli presenti sulla carreggiata. Si mantengono, in maniera analoga alla variante omnicomprensiva anche nella variante selettiva l'informazione semaforica e le informazioni relative alla pianificazione del percorso proprio ed alla linea di mezzzeria. Per approfondimenti riguardo la realizzazione della logica di selezione dei veicoli di interesse si rimanda al lavoro di tesi del collega A. Laurino [52].

4.6 Realizzazione dell'HUD

Una volta individuate le informazioni da mostrare sul display, in variante omni-comprendiva e selettiva, si è proceduto ad implementarle in Unity. Considerando, in primo luogo, l'informazione di rilevazione degli elementi statici e dinamici posizionati nell'ambiente è opportuno, affinché questa possa essere comunicata all'utente, andare a scegliere una metafora di visualizzazione. Sulla base della letteratura esistente e delle proposte di Waymo ed NVIDIA si è deciso di considerare una visualizzazione di tipo *bounding box*, ovvero un parallelepipedo di delimitazione, con la misura di volume più piccola entro cui è contenuto l'oggetto di interesse. La scelta è motivata dal fatto che tale metafora è stata oggetto di utilizzo in alcuni studi. Ad esempio in quello di Lungaro et al. [41], in cui è stata adoperata per identificare i potenziali ostacoli (veicoli e pedoni). Ancora, nel contesto della guida manuale, Phan et al. [40] hanno scelto di utilizzare una metafora tipo *bounding box* per comunicare al guidatore la presenza di potenziali pedoni pericolosi. Da quest'ultimo studio emerge una preferenza da parte dei partecipanti nell'indizio visivo in realtà aumentata di tipo *bounding box*, conforme alla posizione dell'oggetto di interesse, piuttosto che nel pannello di avvertimento, non conforme alla locazione del pedone. Proseguendo, Abdi & Meddeb [55] citano anch'essi l'utilizzo di un *bounding box* per la rilevazione dei pedoni all'interno del loro sistema di trasporto intelligente cooperativo. Oltre a quanto presente in letteratura anche Waymo ed NVIDIA propongono una visualizzazione di tipo *bounding box* nei loro video dimostrativi, il primo optando per una visualizzazione di una geometria in tre dimensioni, il secondo per un riquadro bidimensionale.

Si è, pertanto, deciso di associare agli oggetti un parallelepipedo di delimitazione, analogamente a quanto proposto da Waymo. Tale figura va a racchiudere completamente l'oggetto di interesse, che sia statico o dinamico, segnale stradale o semaforo, con la sola eccezione degli alberi, per i quali l'inclusione totale degli stessi avrebbe comportato una occupazione eccessiva di spazio all'interno dell'ambiente, occultando gli altri oggetti di interesse. Per questi ultimi si è deciso quindi di racchiuderne soltanto il tronco. Si è, dunque, aggiunto, staticamente, a ciascun oggetto che fosse stato assemblato in un *Prefab*, ovvero un oggetto collegato ai diversi componenti di cui esso necessita, un parallelepipedo. Quest'ultimo è stato a sua volta assemblato in un *Prefab*, per potervi aggiungere eventualmente altri componenti ed è stato creato tramite la primitiva *Cube* di Unity. Del parallelepipedo si è calcolata manualmente la dimensione sulla base dell'estensione dell'oggetto a cui si riferisce. Procedere in questa maniera è risultato comodo perché ha consentito di evitare la creazione a runtime del *bounding box* con relativo calcolo della dimensione e perché il *Prefab* dell'oggetto in questione è caricato in fase di esecuzione dell'applicazione con tutti gli elementi necessari, compreso, dunque il parallelepipedo. Per tutti gli altri oggetti, non di tipo *Prefab*, che sono stati caricati direttamente negli scenari, visto l'elevato numero degli stessi, era improponibile la creazione ed il dimensionamento manuale del *bounding box*. La soluzione che si è adoperato consiste, dunque, nell'istanziamento della geometria di delimitazione a runtime, con relativo dimensionamento. L'operazione è più costosa rispetto all'approccio statico di cui sopra, a causa, anzitutto, della funzione di creazione di un oggetto offerta da Unity. Poi, è anche più complessa concettualmente visto il fatto che per determinare la

dimensione del parallelepipedo è opportuno conoscere l'estensione dell'elemento di interesse. L'operazione è non banale a causa delle rotazioni spesso presenti e che ne complicano il calcolo, che Unity rende semplice solo se l'oggetto è allineato al sistema di riferimento del mondo ed a causa delle gerarchie, spesso profonde, degli oggetti stessi. Inoltre, numerosi elementi, erano impostati come *Static*, ovvero non movibili. Tale proprietà viene associata ad un oggetto quando si prevede che esso non debba muoversi durante il gameplay e Unity può, dunque, effettuare delle ottimizzazioni su questi oggetti. Per questi ultimi, si rivela impraticabile il calcolo dell'estensione a runtime visto che dovrebbero essere, in primo luogo, allineati col sistema di coordinate del mondo, operazione non effettuabile a causa della proprietà di cui sopra. Pertanto, si è deciso di associare a tutti gli oggetti dei *Collider*, tramite i quali è possibile accedere alle informazioni di estensione dello stesso, dopo aver opportunamente preso in considerazione tutte le rotazioni applicate al corpo. In questa maniera, una volta nota l'estensione del *Collider* è possibile calcolare la dimensione del *bounding box*.

Per quanto riguarda lo shading del *bounding box*, si è continuato a rifarsi a Waymo, optando per uno shader semitrasparente, con un gradiente di colore che partisse con un azzurro parzialmente opaco e terminasse con una totale trasparenza, e che includesse un contorno bianco che permettesse di identificare immediatamente l'estensione della geometria. Si è realizzato il materiale complessivo tramite l'applicazione contemporanea di due materiali. Il primo che, basandosi su di uno shader di sfumatura, realizzasse il solo gradiente, ed il secondo che tramite uno shader di *outline effect* implementasse il bordo, avendo cura di escludere l'interno dell'oggetto, lasciandolo trasparente, di modo che potesse essere sottoposto all'applicazione del primo materiale.

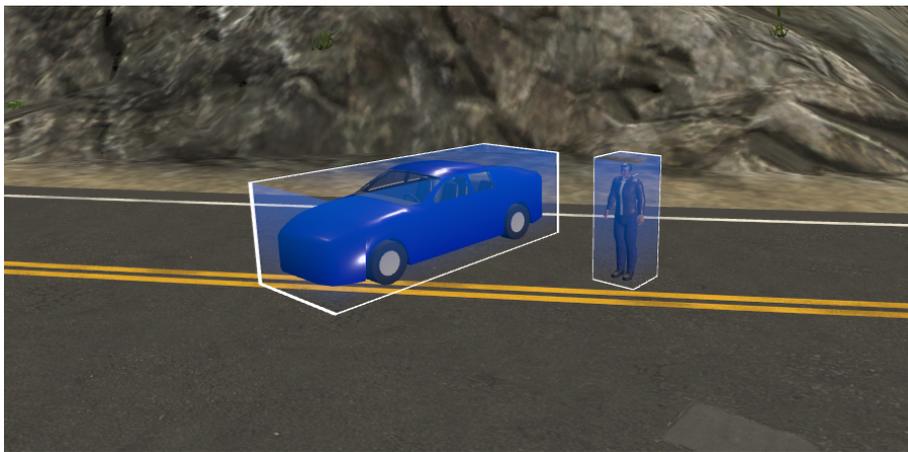


Figura 4.10: Metafora di visualizzazione degli oggetti di tipo *bounding box*.

Dopo aver stabilito come mostrare al passeggero gli oggetti che popolano l'ambiente, ci si è interessati alla questione dell'identificazione degli stessi e della fornitura delle relative informazioni di interesse quali la distanza dall'auto, la velocità assoluta, e la relativa pericolosità. Nel scegliere il tipo di visualizzazione da proporre si è, ancora una volta, trovato rilevante prendere spunto dai video di Waymo ed NVIDIA. La visualizzazione offerta dal produttore di schede grafiche includeva soltanto l'informazione di distanza anche se in modo abbastanza rudimentale dal punto di

vista grafico, per contro, la grafica di Waymo, risultava ben più adatta allo scopo in quanto proponeva entrambe le informazioni all'interno di una etichetta che presentava anche un'icona identificativa dell'oggetto rilevato. Pertanto, si è deciso di implementare una visualizzazione analoga a questa, in quanto ordinata, immediata e completa delle informazioni di interesse. Questo viene incontro al principio di usabilità che suggerisce che l'informazione presentata tramite l'interfaccia debba essere rappresentata in modo da risultare facilmente comprensibile dall'utente, in maniera semplice ed intuitiva [54]. Inoltre, è anche rispettato un criterio di progettazione delle interfacce al fine di ridurre il carico cognitivo nell'utente: secondo Dekker & Woods [56] in presenza di una grande quantità di informazioni è necessario utilizzare degli indizi che comunicano un'informazione in maniera semplice e chiara, preferibilmente tramite visualizzazioni familiari come icone. Si è implementata l'etichetta informativa tramite lo *UI System* di Unity, ovvero lo strumento di creazione delle interfacce utente. Questo permette di definire l'interfaccia mediante la creazione di una *Canvas*, l'area che ospita tutti gli elementi di tipo UI e di ivi inserire quelli di interesse che nel seguente caso sono i campi testuali per contenere le misure di distanza e velocità ed un elemento immagine per associarvi l'icona identificativa dell'oggetto di riferimento. Per quanto riguarda lo shading dell'etichetta si è optato per un pannello semitrasparente di colore grigio, analogamente a quanto fatto da Waymo. A questo punto la *Canvas* è assemblata in un *Prefab* ed è pronta per essere istanziata a runtime.



Figura 4.11: Etichetta ed informazioni di interesse.

In realtà la definizione dell'interfaccia è il passo più semplice da effettuare perché ad essa sono associate diverse questioni da risolvere in merito alla posa della stessa, dimensionamento e visibilità, sovrapposizione e leggibilità.

La posa dell'etichetta fa riferimento a dove collocarla relativamente all'oggetto a cui si riferisce (posizione) e come ruotarla affinché risulti leggibile dall'utente (orientamento). Dopo diversi tentativi di posizionamento della *Canvas*, si è convenuto che la soluzione più appropriata fosse quella di utilizzare un offset dall'oggetto variabile a seconda dell'oggetto stesso. Infatti, vi sono elementi nell'ambiente che possono estendersi maggiormente in verticale (lungo l'asse Y) oppure lungo gli assi X o Z, quindi un offset fisso non può tenere conto di tali diversità. Si è, pertanto, calcolato manualmente un vettore di traslazione che si riferisce singolarmente a

ciascuna tipologia di oggetto e che servisse per definire lo spostamento dell'etichetta a partire dalla posizione di riferimento, individuata nel centro dell'oggetto a cui essa è associata. Ad esempio, per le auto la *Canvas* è stata posta al di sopra delle stesse, mentre per gli alberi è stata collocata a circa il 25% della struttura verticale, quindi con un offset negativo lungo l'asse Y. Analogamente è stato fatto per le etichette relative alla segnaletica stradale. Per l'etichetta relativa al semaforo, la si è collocata al centro tra le due lanterne semaforiche, con un offset negativo lungo l'asse Y. Si è associato a tale elemento soltanto un'etichetta piuttosto che due, pur essendo presenti due lanterne semaforiche, che però regolano lo stesso tratto stradale; in questa maniera è possibile soffermare l'attenzione del passeggero su una etichetta, ben visibile da lontano, piuttosto che due, indicanti il medesimo contenuto e delle quali si sarebbe poi dovuta gestire la sovrapposizione. Per quanto riguarda l'orientazione dell'etichetta si è utilizzata la tecnica delle *Billboard Sprites*, ovvero dei piani automaticamente ruotati in accordo alla camera principale. In questo caso la *Canvas* è orientata secondo la direzione definita dalla congiungente tra il centro della *Canvas* stessa e la posizione della camera all'interno del veicolo. Dunque, l'etichetta è sempre rivolta verso l'auto e può, pertanto, essere sempre leggibile dal conducente. Inoltre, è applicato un ulteriore offset lungo tale direzione in modo da scostare l'etichetta dal centro dell'oggetto. Anche tale offset dev'essere variabile in funzione dell'estensione lungo gli assi X o Z dell'oggetto stesso.

Il problema del dimensionamento è, invece, associato a quello della visibilità ed è dovuto al fatto che, quando l'etichetta di un oggetto è visualizzata ad una certa distanza risulta troppo piccola per poter essere letta e compresa, perciò è opportuno scalarla in funzione della lontananza. Per stabilire di quanto ridimensionare l'etichetta si è, inizialmente definita una dimensione della stessa che fosse leggibile ad una certa distanza, che si è individuata in 5.5 m. A quel punto, non potendo semplicemente ingrandire senza alcuna condizione la *Canvas* in funzione della distanza, pena l'ottenere per etichette molto lontane delle dimensioni eccessive che avrebbero finito con l'occludere l'intera visuale del parabrezza e si sarebbero sovrapposte tra di loro, si è ritenuto che, in realtà, l'interesse dell'utente fosse rivolto verso le targhette più vicine; quelle più lontane, possono essere lette in seguito, in quanto di minor utilità in quel momento, perciò si rivelava inutile ingrandirle. Si è, quindi, individuata un'ulteriore distanza di lettura delle etichette vicine, che si è supposta pari a 30 m. Le etichette che sono, pertanto, comprese in una distanza tra i 5.5 m ed i 30 m sono ingrandite secondo una curva di *ease-in-out* fino a raggiungere la dimensione a 30 m che è calcolata come una frazione della massima dimensione dell'etichetta. La massima dimensione, è quella che si avrebbe a distanza di 150 m. Questa sarà definita in seguito come la massima distanza entro la quale mostrare gli oggetti, affinché continui a valere il rapporto tra dimensione e distanza specificate inizialmente, quindi a 5.5 m. Per valori di distanza superiori a 30 m la targhetta è ridotta di dimensione sempre secondo la medesima curva di *ease-in-out* finché non raggiunge la dimensione iniziale, specificata per 5.5 m. Il fatto di andare a regolare la dimensione della *Canvas* sulla base della distanza segue il principio di usabilità delle interfacce; infatti, esso suggerisce di disporre le informazioni sul display in maniera chiara e facilmente comprensibile dall'utente [54].

Un ulteriore problema da risolvere riguarda la sovrapposizione delle *Canvas*. Esso si verifica quando più etichette condividono una stessa porzione dello schermo,

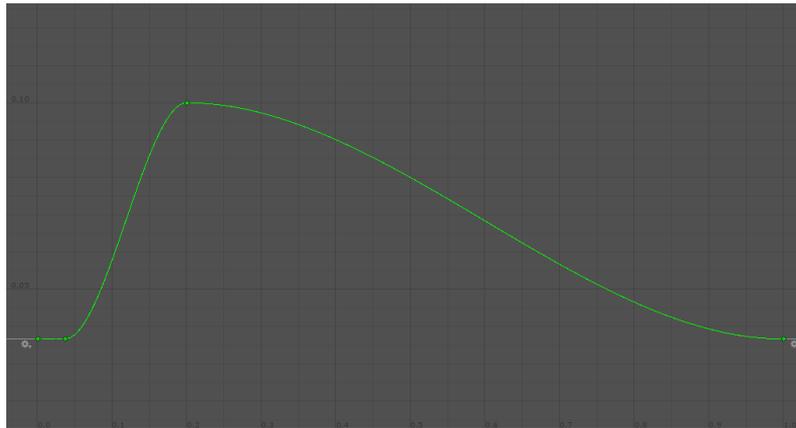


Figura 4.12: Funzione di resize normalizzata dell’etichetta in Unity. L’asse orizzontale misura la distanza, l’asse verticale misura la dimensione.

andando quindi ad occludersi tra di loro. La questione non è banale da risolvere nella sua totalità, pertanto, si è analizzato e risolto il problema per le *Canvas* che si trovano ad una distanza molto vicina tra di loro e che quindi possono essere in un certo senso agglomerate in “cluster” e per le quali la sovrapposizione si rivela più fastidiosa. In particolare, le etichette che si trovano in questa condizione sono quelle riferentisi alla segnaletica stradale: i cartelli posti sui pali stradali si trovano molto vicini tra di loro, perciò l’occlusione risulta inevitabile. La sovrapposizione tra le relative etichette è stata gestita tramite una funzione che va ad agire una volta che è stato stabilito il posizionamento definitivo di tutte le targhette all’interno di uno specifico frame. Quest’ultima è chiamata nella funzione evento di Unity *LateUpdate*, che viene chiamata in seguito al completamento di tutte le funzioni di *Update*. Per gestire la sovrapposizione, nella funzione sono state ordinate tutte le etichette in ordine decrescente lungo l’asse Y. Dunque, per ogni etichetta sono stati individuati tutti i vicini, che si è supposto essere a distanza di 2 m. Dopo di che se vi era sovrapposizione tra l’etichetta in analisi ed i suoi vicini, era applicata a questa un offset positivo lungo l’asse Y, di una quantità pari alla distanza che misurava la relativa percentuale di sovrapposizione. In questo modo, tutte le etichette soggette al problema subivano una traslazione verso l’alto, impilandosi in una sorta di stack, senza più occludersi tra di loro.

Si è dovuto gestire anche la questione della leggibilità della targhetta la quale, ad una certa distanza dall’osservatore e nonostante la sua dimensione fosse quella calcolata secondo la funzione di riscalamento, risultava poco leggibile e affetta da aliasing e flickering. In particolare, il testo risultava poco leggibile e l’immagine identificativa dell’oggetto di riferimento poco comprensibile e soggetta ad un fenomeno di scintillio. Si è risolta la questione della scarsa leggibilità del testo, andando ad utilizzare in luogo del testo standard offerto da Unity, *Unity’s UI Text*, l’asset *TextMesh Pro* che va a produrre un testo vettoriale con contorni netti. La comprensibilità del testo è di gran lunga migliorata grazie a questo. Per quanto riguarda la qualità dell’immagine di riferimento si è tratto beneficio dall’abilitazione della proprietà *Generate MipMap*, relativa alle texture. Quest’ultima proprietà abilita la creazione di una lista progressiva di versioni ridotte in dimensione di una texture al fine di ottimizzare la performance sui motori 3D real-time. Gli oggetti distanti dalla

camera utilizzano le versioni a risoluzione più piccola dell'immagine. Per il fatto che le differenti versioni dell'immagine vengono sottoposte all'azione di un filtro di blurring, l'aliasing è diminuito ed il fastidioso effetto visivo è risultato attenuato.

Si è, quindi, proseguito esaminando in che modo rappresentare e come ottenere l'informazione di pericolosità degli oggetti. Per quanto riguarda la modalità di visualizzazione la scelta è stata pilotata dagli HUD prototipali e dai vari studi del caso. Dalle proposte di Continental, Daqri, Hyundai e PSA si evince come il colore giochi un ruolo importante nello stabilire la pericolosità di un oggetto. Infatti, in tutti tali dispositivi lo stato di maggiore o minore pericolosità di un oggetto è rappresentato con un colore che va dal giallo al rosso. PSA codifica lo stato di bassa pericolosità di un oggetto tramite il verde. Ancora, in letteratura vi sono lavori in cui si utilizza un codice colore per codificare lo stato di un oggetto. Ad esempio il sistema "Driver Assistance by Augmented Reality for Intelligent Automobile" (DAARIA), proposto da George et al. [57] adotta un codice colore intuitivo in cui la severità del pericolo di un ostacolo rilevato sulla strada è mostrata per mezzo di un codice colore che parte dal verde (sicurezza) e si estende fino al rosso (massimo stato di pericolo). Inoltre, l'ISO 22324 [58], ovvero lo standard internazionale che fornisce linee guida per l'utilizzo di codici colore al fine di informare le persone esposte ad una fonte di pericolo ed esprimere la severità di una tale situazione, stabilisce tre colori: il rosso, il cui significato è quello di prendere un'azione opportuna immediatamente, il giallo che esorta a prendere un'azione opportuna ed il verde che suggerisce di non eseguire alcuna azione. Inoltre, raccomanda che qualora siano necessari più livelli di stima della pericolosità, si utilizzino i colori all'interno dello spettro compreso tra il rosso ed il verde. Perciò si è deciso di utilizzare un gradiente di colore dal verde fino al rosso per rappresentare lo stato di pericolosità di un oggetto.

Una volta stabilito in che maniera segnalare un pericolo si è rivolta l'attenzione a come ottenere l'informazione di pericolosità. L'ambiente include diversi attori: vi sono i veicoli che definiscono il sistema di traffico intelligente, gli ostacoli come i pedoni, gli stessi veicoli o eventualmente degli animali e gli elementi statici come i pali di illuminazione, gli alberi o le auto parcheggiate. Per quanto riguarda la gestione della pericolosità dei veicoli del sistema del traffico e degli oggetti statici è stato considerato l'ISO 15623 [59], ovvero lo standard internazionale che specifica i requisiti di prestazione e le procedure di test per i veicoli equipaggiati con "forward vehicle collision warning system" (FVCWS) ovvero un sistema in grado di avvisare il guidatore di una potenziale collisione con i veicoli che precedono. L'ISO 15623 [59] definisce veicolo di prova come il veicolo in cui è installato il FVCWS. Dopodiché il veicolo che precede e che può diventare un potenziale ostacolo è rilevato dai sensori di cui è equipaggiato il veicolo di prova, come quelli basati su tecnologia radar o le telecamere. Per valutare una potenziale collisione con il veicolo che precede, si utilizza un modello matematico che prevede l'uso di un algoritmo di avvertimento basato sulla distanza. Quest'ultimo calcola la velocità assoluta del veicolo di prova e del veicolo che precede per determinare la distanza di avvertimento. Questa distanza è confrontata con la distanza dal veicolo che precede, misurata tramite i sensori del veicolo di prova e se risulta inferiore a quella misurata, il guidatore è avvisato tramite un alert visivo e possibilmente, suggerisce lo standard, anche acustico. La distanza di avvertimento di una potenziale collisione può essere regolata in modo da renderla più o meno conservativa, scegliendo in maniera appropriata i valori di

T e la decelerazione del veicolo, a . Segue la formula del calcolo della distanza di avvertimento:

$$D = V_1 \times T + \left(\frac{V_1^2}{2a_1} - \frac{V_2^2}{2a_2} \right) \quad (4.1)$$

dove

D è la distanza dal veicolo che precede;

V_1 è la velocità del veicolo di prova;

V_2 è la velocità del veicolo che precede;

T è il tempo di reazione del conducente;

a_1 è la decelerazione del veicolo di prova;

a_2 è la decelerazione del veicolo che precede.

La 4.1 permette di gestire veicoli che accelerano, decelerano o procedono a velocità costante ed elementi dell'ambiente statici. Nel caso di veicoli stazionari o elementi statici la 4.1 si riduce a:

$$D = V_{Rel} \times T + \left(\frac{V_{Rel}^2}{2a_1} \right) \quad (4.2)$$

dove

$$V_{Rel} = V_1 - V_2.$$

Nel caso di elementi statici si pone $V_{Rel} = V_1$. Lo standard suggerisce i valori di riferimento da assegnare al tempo di reazione del conducente, T , ed alla decelerazione dei veicoli, a per regolare la distanza di avvertimento. In particolare, i valori di T si basano sullo studio di Johansson & Rumar [60]. Lo studio si è proposto di valutare il tempo di reazione del conducente andando a misurare il ritardo nell'esecuzione di una frenata a seguito di un'indicazione sonora fornita mediante un clacson. I risultati hanno mostrato una distribuzione di valori compresi tra 0.3 e 2.0s, con valor medio pari a 0.66s. Per quanto riguarda la decelerazione a , i valori sono stati ottenuti misurando la decelerazione che l'utente imprime in una situazione di frenata di emergenza su una strada piana e asciutta. I test hanno indicato dei valori compresi tra 3.6 m/s² e 7.9 m/s². Il valor medio di a per veicoli destinati al trasporto di passeggeri è stato 7.0 m/s² e quello per veicoli commerciali pari a 5.3 m/s². In generale, i valori sono molto dispersi attorno al valor medio e dipendono dal tipo di veicolo, dalle condizioni di carico del veicolo e dal tempo di reazione del guidatore.

Per quanto riguarda la gestione della pericolosità degli ostacoli presenti nell'ambiente si è considerato lo studio di Sebastian et al.[61]. Gli autori si sono proposti di migliorare un sistema anticollisione di tipo cooperativo per veicoli stradali, per mezzo di un modello basato su grafi che rappresentasse le interazioni tra i veicoli in

una specifica regione ed in uno specifico istante di tempo. In particolare lo studio definisce tre casi distinti di interazione tra una coppia di veicoli: il primo modella due veicoli che procedono nella stessa direzione, il secondo modella due veicoli che viaggiano in direzione opposta ed il terzo modella la situazione di intersezione tra le direzioni dei due veicoli. Quest'ultimo risulta il caso di interesse per gestire la pericolosità degli ostacoli dato che essi sono stati disposti nell'ambiente in modo tale da intersecare la traiettoria di viaggio dell'auto autonoma. In particolare, il caso di intersezione analizzato nello studio Sebastian et al. [61] fa riferimento a due veicoli che hanno traiettorie intersecantisi e vi è una possibilità di collisione. Per stabilire se le direzioni di marcia dei veicoli si intersecano sono da utilizzare le seguenti formule per il calcolo del punto di intersezione (x_x, y_x) :

$$x_x = \frac{(y_B - y_A) - (x_B \cot \theta_B - x_A \cot \theta_A)}{\cot \theta_A - \cot \theta_B} \quad (4.3)$$

$$y_x = \frac{(x_B - x_A) - (y_B \tan \theta_B - y_A \tan \theta_A)}{\tan \theta_A - \tan \theta_B} \quad (4.4)$$

dove

(x_A, y_A) è la posizione del primo veicolo nel sistema di riferimento;

(x_B, y_B) è la posizione del secondo veicolo nel sistema di riferimento;

θ_A è la direzione del primo veicolo rispetto ad una direzione di riferimento (nord);

θ_B è la direzione del secondo veicolo rispetto ad una direzione di riferimento (nord).

A questo punto, noto il punto di intersezione (x_x, y_x) , si procede al calcolo del tempo che i veicoli impiegherebbero per raggiungere tale punto. Se i tempi di entrambi i veicoli coincidono, a meno di una soglia che va a modellare il fatto che i due veicoli sono stati approssimati a dei punti, allora c'è la possibilità che si verifichi una collisione. Nell'applicazione visto che gli ostacoli sono stati progettati in modo che potesse esserci la possibilità di una collisione, è stato omesso questo calcolo. Una volta stabilita la possibilità di una collisione, si calcola una distanza di sicurezza D_{sn} per mezzo della seguente formula:

$$D_{sn} = V_n \times T + \frac{1}{2} \left(\frac{V_n^2}{a_n} \right) \quad (4.5)$$

dove

D_{sn} è la minima distanza necessaria al veicolo n per arrestarsi imprimendo una decelerazione a_n ;

V_{sn} è la velocità del veicolo n;

T è il tempo di reazione del conducente;

a_n è la decelerazione del veicolo n .

Si misura, dunque, la distanza tra il veicolo n ed il punto di intersezione (x_x, y_x) ; se tale distanza è inferiore alla distanza di sicurezza D_{sn} è opportuno avvertire il guidatore della pericolosità dell’ostacolo.

Avendo a disposizione le formule di determinazione del pericolo per tutti gli elementi di interesse si è proceduto ad implementare l’algoritmo in Unity. In primo luogo, ci si è basati sull’algoritmo proposto da Unity nel tutorial “Enemy Sight and Hearing” [62], per realizzare un cono di vista, come illustrato in figura 4.13. Questo algoritmo è servito per determinare se la posizione di un veicolo del sistema di traffico intelligente o di un elemento statico dell’ambiente fosse compresa all’interno dell’angolo di definizione del cono di vista. In particolare si è scelto come angolo 5° , in modo da poter individuare i veicoli che precedono e che si trovano all’interno della stessa corsia dell’auto autonoma ed escludere quelli nelle altre corsie.

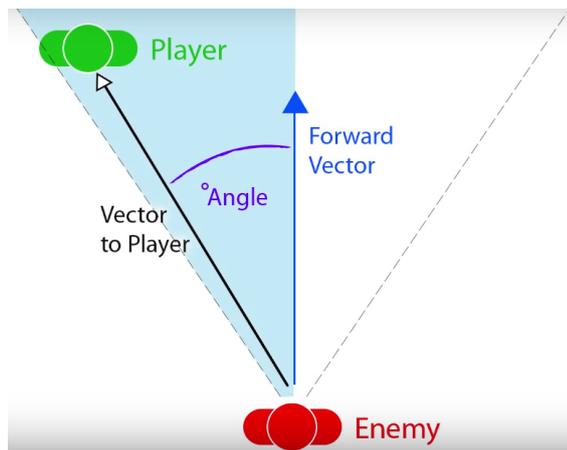


Figura 4.13: Visione di tipo “field of view” in Unity.

L’algoritmo prevede di calcolare l’angolo compreso tra il vettore di forward dell’auto e quello dato dalla differenza tra la posizione dell’oggetto e la posizione dell’auto tramite la funzione di Unity *Angle*; se il valore restituito dalla funzione è minore della metà dell’angolo di vista scelto l’oggetto è all’interno del cono di vista. In seguito, va a calcolare se vi è qualcosa che si frappone tra l’auto e l’oggetto stesso tramite la funzione di Unity *Raycast* che traccia un raggio lungo la congiungente. Se la funzione restituisce true l’oggetto in esame è all’interno del cono di vista ed è anche visibile. L’algoritmo appena spiegato rappresenta la base da cui partire per ottenere un valore di pericolosità dell’oggetto. Se l’oggetto si trova all’interno del cono di vista, risulta visibile ed è un veicolo del sistema di traffico che procede a velocità costante o è un elemento statico si utilizza la 4.2 per ottenere il valore della distanza di avvertimento. In condizioni di accelerazione o decelerazione da parte del veicolo si utilizza la 4.1. L’algoritmo è poi stato migliorato per gestire la situazione di oggetti pericolosi molto vicini all’auto autonoma. In tale situazione, risulta che, mantenendo inalterato l’angolo di vista specificato inizialmente, l’oggetto esce dal cono di vista. Per questo motivo si è stabilito che ad una distanza dall’auto pari ad 8 m l’angolo di vista assume il valore di 25° .

Se l'oggetto, invece, risulta un ostacolo si utilizza un algoritmo basato sul calcolo dell'intersezione mediante una funzione che, presi due segmenti, ciascuno definito da due punti, in input, restituisce il punto in comune tra di essi. Una volta appurata l'esistenza dell'intersezione tra i segmenti che vanno a definire le traiettorie rispettivamente dell'auto e del potenziale ostacolo è applicata la 4.5 per il calcolo della distanza di sicurezza.

Si è, dunque, calcolato un indice di pericolosità, compreso tra 0 ed 1, dato dal rapporto tra la distanza dall'ostacolo e la distanza di avvertimento. Tale indice è, poi, stato codificato tramite una legge di potenza perché questo aiuta a mantenere l'informazione visiva in un dominio il più possibile uniforme dal punto di vista percettivo: nel sistema visivo umano, il legame tra la *brillanza* (brightness) B e la *luminanza* (luminanza) L non è lineare, ma segue una legge di potenza: $B = kL^n$. Codificando l'informazione visiva tramite la legge di potenza con esponente pari al reciproco di quello della risposta del sistema visivo umano fa sì che l'informazione visiva venga percepita correttamente.



Figura 4.14: Ostacolo con bounding box ed etichetta in Unity.

Una volta ottenuto l'indice di pericolosità di un oggetto si è andati a gestire il cambio di colore del rispettivo *bounding box*. Il cambio di colore è stato implementato andando a definire su Unity un gradiente: quest'ultimo è completamente specificato una volta che sono stati definiti i colori e gli istanti di tempo relativi, compresi tra 0 ed 1, in cui gli stessi colori vengono applicati. Dopo di che è possibile ottenere il colore che segnala il grado di pericolosità di un oggetto per mezzo della funzione di Unity *Evaluate* che restituisce il corrispondente colore, fornendo in input l'istante di tempo relativo. In questo caso il dato da fornire in ingresso alla funzione è rappresentato dall'indice di pericolosità, mappato anch'esso tra 0 ed 1. A questo punto si va ad applicare il colore ottenuto, al materiale del relativo *bounding box* per ottenere la resa grafica finale. In figura 4.14 è mostrato un ostacolo pericoloso che interseca la traiettoria dell'auto autonoma. È possibile osservare il grado di pericolosità dell'ostacolo tramite il *bounding box* di colore rosso, che segnala una situazione in cui è necessario eseguire immediatamente un'azione.

Per segnalare all'utente il pericolo, oltre all'informazione di colore si è utilizzata anche un'informazione di lampeggio delle etichette in condizioni di pericolo compreso nell'intervallo tra il giallo ed il rosso in modo da permettere al conducente di ottenere una ulteriore indicazione visiva che potesse indirizzare la sua attenzione

verso l'ostacolo. L'inserimento di tale informazione è giustificato dal fatto che il lampeggio è adoperato nei sistemi di assistenza alla guida di vari produttori auto per segnalare un pericolo [63, 64]. Inoltre lo standard ISO 15623 [59] suggerisce di emettere un avviso visivo per segnalare un pericolo in maniera intermittente e l'intermittenza deve essere più o meno frequente a seconda della gravità del pericolo. Il lampeggio è stato realizzato su Unity per mezzo del componente *Animator*. Tale componente viene utilizzato in Unity per assegnare un'animazione ad un *GameObject* all'interno della scena e richiede un riferimento all'*Animation Controller*, una macchina a stati che definisce quali animazioni utilizzare, e controlla quando e come passare dall'una all'altra. In particolare è stato associato all'etichetta uno stato di *Idle* in cui non è applicata alcuna animazione ed uno stato di *Blinking* in cui è applicata l'animazione di lampeggio in loop. Dunque, il passaggio da uno stato ad un altro è regolato da una variabile booleana il cui valore è cambiato in funzione del grado di pericolosità dell'oggetto. È rilevante, tra l'altro, porre l'attenzione sul fatto che tramite l'informazione di lampeggio, il veicolo di prova comunica all'utente il perché sta per effettuare una determinata azione. Infatti, l'auto manifesta un'intenzione di modificare il proprio comportamento a seguito di un evento pericoloso, e tramite il lampeggio ne segnala la causa. L'informazione del perché l'auto sta per compiere una determinata azione, detta informazione di tipo *why*, rappresenta uno degli undici fattori che contribuiscono alla formazione della fiducia, secondo Ekman et al. [3].

L'informazione di lampeggio, utilizzata a frequenza più bassa, è stata utilizzata anche, per segnalare all'utente la presa in considerazione di un segnale stradale o di un semaforo. In presenza di un cambio di stato del semaforo o di riconoscimento di un segnale stradale relativo all'auto e che questa sta considerando, oltre a mostrare le informazioni di *bounding box* ed etichetta informativa, l'auto effettua il lampeggio dell'etichetta. Il fatto di mantenere l'utilizzo del lampeggio, associato però ad eventi diversi da quelli pericolosi è giustificabile col fatto che la metafora del lampeggio trova già utilizzo nel caso del pericolo e quindi potrebbe risultare più facilmente intuibile dall'utente, mentre la frequenza di lampeggio più bassa è spiegabile col fatto di rendere meno allarmante l'evento, in modo da distinguerlo da un pericolo.

Ancora, si è deciso di introdurre, in condizioni di pericolo rosso, un alert sonoro. Tale introduzione è giustificata dallo studio di Ferati et al. [28] che suggerisce di progettare un'interfaccia per auto autonome in maniera multimodale ovvero tramite l'introduzione di feedback rivolto a più unità sensoriali. In questo caso, quindi, si sta prendendo in considerazione oltre al canale visivo anche quello uditivo. Anche lo standard ISO 15623 [59] suggerisce di accostare ad un'informazione visiva anche un avviso acustico per la segnalazione di un pericolo. Inoltre, diversi sistemi di assistenza alla guida introdotti dalle case automobilistiche nelle auto di loro produzione [65, 66, 64] introducono un avviso sonoro di segnalazione del pericolo in condizioni di frenata di emergenza, il che giustifica il suo utilizzo in condizioni di pericolo rosso. In merito al suono da utilizzare si è optato, per coerenza con il modello di auto autonoma scelto, quello rappresentativo dell'alert di pericolo utilizzato dalla stessa Tesla. Il suono è gestito in Unity tramite l'assegnazione del componente *AudioSource* ad un oggetto per permettere la riproduzione della clip di interesse. Inoltre è opportuno anche assegnare il componente *AudioListener*, normalmente alla camera principale dell'applicazione. Questo si comporta come un microfono, che registra le

onde sonore, e le riproduce all'interno della scena. Nell'applicazione si è collegato il componente *AudioSource* al *GameObject* dell'etichetta ed il componente *AudioListener* alla camera principale. Quindi, la clip relativa all'avviso acustico di pericolo è riprodotta quando un ostacolo è in condizione di pericolo rosso.

Si è utilizzata un'informazione sonora anche per la presa in carico del segnale stradale, per cercare di indirizzare l'attenzione dell'utente in direzione del cartello. In questo caso si è utilizzato un suono più gradevole, meno allarmante, in modo che l'utente non lo percepisse come un pericolo.

Proseguendo, si è focalizzata l'attenzione su come implementare l'informazione di *Path Planning*, ovvero l'informazione di pianificazione del percorso che l'auto seguirà a partire dall'inizio dell'esperienza autonoma, fino al termine della stessa, raggiungendo la posizione obiettivo. In primo luogo si è scelta una metafora di visualizzazione di tale informazione. A tal proposito ci si è attenuti ai concept proposti dai produttori auto e digitali e dalla letteratura dell'ambito. Sono state seguite le proposte di Daqri, Gruppo PSA e Waymo (vedi Tabella 4.1). I primi due propongono la tracciatura di una linea semitrasparente, sovrapposta al tratto di strada da percorrere, come informazione di navigazione assistita per il conducente. Waymo, propone lo stesso tipo di metafora di visualizzazione, allo scopo però di fornire l'informazione di pianificazione del percorso. In letteratura è interessante lo studio di Nazrt et al. [67] che propone un nuovo paradigma di visualizzazione dell'informazione di navigazione assistita. Quest'ultimo si basa sulla metafora della "strada aumentata" che fornisce al guidatore un cammino semitrasparente sovrapposto alla strada reale, che egli possa seguire, mantenendo lo sguardo rivolto al contesto stradale. Tale modalità di rappresentazione delle informazioni reca dei vantaggi: il posizionamento del percorso virtuale sulla strada reale permette di eliminare l'ambiguità presente nei sistemi di navigazione tradizionali relativa all'informazione di svolta in presenza di due bivi consecutivi. Tale concetto di visualizzazione consente anche al guidatore di riconoscere i bivi, che sono occultati alla sua vista, perché altri veicoli o dei tratti di strada con variazione di pendenza restringono il suo campo visivo. Di conseguenza, gli autori considerano il paradigma proposto come autoesplicativo, facile da visualizzare e di aiuto per comprendere eventuali istruzioni di manovra che risultino ambigue ed incrementare in maniera cospicua gli aspetti relativi alla sicurezza. Sulla base, quindi, di quanto proposto in ambito industriale e di ricerca si è optato per la modalità di visualizzazione del tracciato collocato in maniera conforme alla posizione della strada. Una volta scelta la modalità di rappresentazione di tale informazione si è studiato come ottenerla. Essendo già presente di default in GENIVI il sistema di mapping dell'infrastruttura stradale dell'ambiente urbano tramite waypoint si è deciso di utilizzarlo allo scopo di ottenere l'informazione sul cammino di percorrenza dell'auto. Infatti, tali waypoint rappresentano i percorsi effettuabili dall'auto autonoma e dalle auto del traffico. In particolare, l'infrastruttura stradale dell'ambiente urbano è organizzata in incroci ed in strade che collegano tali incroci.

Considerando soltanto la struttura corrente e quella successiva la linea si fermerebbe al termine dell'incrocio e non fornirebbe all'utente un'informazione completamente chiara del percorso che l'auto intende seguire, pertanto, si rivelava necessario ottenere l'informazione relativa alla strada ancora successiva. Si è considerata, a



Figura 4.15: Sistema di mapping dell'infrastruttura stradale.



Figura 4.16: Applicazione ripetuta dell'algoritmo di Chaikin.

tale scopo, una ulteriore struttura dati che memorizza l'intero percorso stabilito per l'auto autonoma come un array di strutture dati di tipo *RoadGraphEdge* ovvero una struttura che contiene l'indice e il sottoindice di una certa strada. Dalla conoscenza dell'indice e del sottoindice è possibile accedere alla struttura di tipo *TrafEntry* relativa da cui estrarre i waypoint. Quindi, si è considerata la strada immediatamente successiva all'incrocio corrente in modo da ottenere la linea finale che quindi risulta composta di tre segmenti ciascuno riferentesi rispettivamente alla strada corrente, al percorso dell'incrocio ed alla strada successiva all'incrocio.

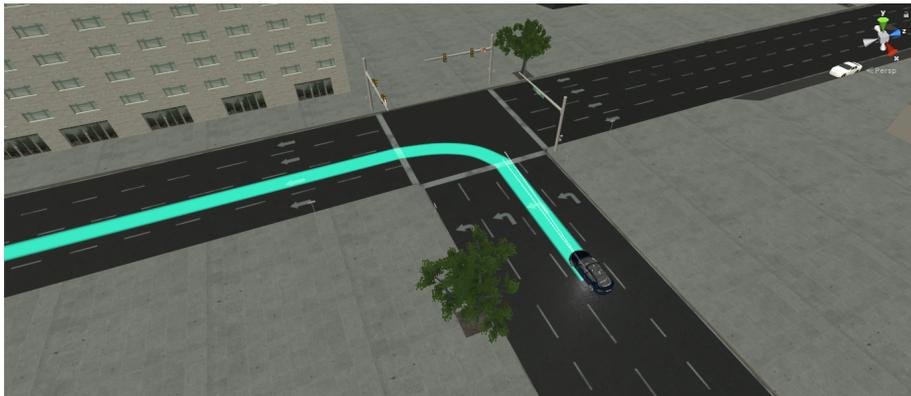


Figura 4.17: Linea di pianificazione del percorso.

Una volta stabilita la metafora visiva ed ottenuta l'informazione della linea di pianificazione del percorso ci si è occupati dell'implementazione effettiva di tale informazione. Unity offre il componente *Line Renderer* che permette di disegnare una linea retta tra due punti. In particolare assegnando ad un array di posizioni incluso nella struttura dati che descrive tale componente un insieme di punti, il *Line Renderer* disegna una linea tra ciascuna coppia di punti. Inoltre, esso offre diverse opzioni di personalizzazione come la definizione di un gradiente, la scelta di uno o più

materiali, la modalità di disegno della linea ed il suo spessore. Si è, dunque, deciso di utilizzarlo per rappresentare il percorso. Per rendere il *Line Renderer* operativo è opportuno dare delle posizioni in input al vettore: si considerano, dunque, i waypoint ottenuti tramite la struttura *TrafEntry*, quando si verifica una delle tre condizioni definite in precedenza. Dopo di che l'aggiornamento dei waypoint nel vettore è effettuato secondo una certa frequenza, che per questioni di ottimizzazione è stata impostata a 0.25 s. Per quanto riguarda lo shading della linea, ci si è ispirati alla grafica di Waymo e si è optato per uno shader semitrasparente, con un gradiente di colore che partisse con un verde acqua parzialmente opaco e terminasse con una totale trasparenza. Il gradiente è stato applicato sia longitudinalmente, ovvero lungo la tangente alla linea ma anche ortogonalmente alla stessa, per sfumare i bordi in modo da contribuire ad una migliore resa visiva. Il primo gradiente è stato definito direttamente mediante il pannello di configurazione del *Line Renderer*, mentre il secondo è stato realizzato con una filosofia differente, ovvero tramite una texture di sfumatura, realizzata su Photoshop, ed applicata come texture dello shader, il quale supporta l'applicazione di un'immagine per definire il colore base del materiale.

L'informazione di pianificazione del percorso è stata, dunque, associata anche alle altre vetture, in modo da rendere visibile al passeggero la strada che esse hanno intenzione di seguire. Pertanto, analogamente a quanto fatto per la Tesla si è replicata la logica di gestione della linea anche per le vetture del sistema di traffico automatico. Si è resa differente la rappresentazione grafica utilizzando uno spessore inferiore ed un colore distinto, entrambi proprietà impostabili nelle opzioni di personalizzazione del *Line Renderer*, in modo da non generare confusione nell'utente.

Ci si è, a questo punto, occupati dell'implementazione dell'informazione relativa alla linea di mezzzeria. Anche in questo caso si è dovuto individuare una metafora di visualizzazione e comprendere come ottenere l'informazione di interesse. Per la rappresentazione visiva ci si è attenuti a quanto già realizzato, ovvero si è considerato il disegno di una linea sovrapposta alla striscia di delimitazione delle corsie. Per comunicare all'utente che l'auto ha compreso che il tratto stradale su cui si trova è quello del giusto senso di marcia e che si trova ad una certa distanza dalla striscia stessa si è optato per un gradiente di colore. Esso è stato già scelto per la rappresentazione della pericolosità di un oggetto, quindi si è mantenuta la coerenza della metafora di visualizzazione, in modo da rendere l'informazione più comprensibile dall'utente. Per il disegno della linea si è ancora una volta utilizzato il *Line Renderer*, che richiede di popolare un array di posizioni rappresentative della linea stessa.

Per ottenere dei punti rappresentativi della linea di mezzzeria, sono stati individuati tutti i tratti di strada a doppio senso di marcia, facenti parte del percorso dell'auto autonoma e sono stati mappati con dei punti. Per effettuare tale operazione, si è deciso di utilizzare l'asset di Unity, *Curvy Splines*, che offre la creazione di curve di Bézier, ampiamente utilizzate nell'ambito della computer grafica e che consentono di ottenere dei disegni curvilinei molto precisi e smussati, quindi gradevoli visivamente. In realtà l'asset è stato considerato, in primo luogo, perché tramite esso verrà mappato l'ambiente urbano con una curva rappresentativa dell'intero percorso dell'auto autonoma, allo scopo di generare la linea di pianificazione del percorso da collocare sul navigatore. Per questo motivo, visto che l'asset trova già applicazione

per la generazione della linea sul navigatore, allora si è ritenuto di utilizzarlo anche allo scopo di generare la linea di mezzzeria. L’asset permette di definire una curva tramite la creazione di un oggetto di tipo *Spline* e creando dei punti di controllo di tipo *Spline Segment*. Questi ultimi vanno a definire i segmenti che compongono il percorso e la curvatura di questi ultimi è regolabile mediante le *handle* associate a ciascun punto di controllo. Sono stati creati, dunque, degli oggetti di tipo *Spline*, ciascuno associato al tratto di strada a doppio senso di marcia. Il perché della creazioni di più di un oggetto di tipo *Spline* è dovuto al fatto che la linea di mezzzeria non è continua, ma esiste soltanto in alcuni tratti stradali ed un oggetto di tipo *Spline* descrive soltanto una curva continua. Perciò, sono serviti diversi oggetti di tipo *Spline* che vanno a definire più curve continue, ciascuna rappresentativa di un certo tratto stradale a doppio senso di marcia. Per stabilire quale *Spline* considerare per il disegno della relativa linea in un certo istante di tempo, si è collocato su ciascun tratto di strada un *Mesh Collider*, ovvero un *Collider* che approssimasse la forma della strada stessa e, tramite la tecnica del *Raycasting*, si è stabilito sulla base del *Collider* intersecato quale ramo stradale considerare. Per la rappresentazione grafica della linea si è optato per lo stesso shader utilizzato per la linea di pianificazione mostrata sull’HUD, riducendo, però lo spessore della stessa. È stato, quindi, definito il colore da assegnare alla linea. Innanzitutto, si è dovuto definire un criterio che permettesse di stabilire che l’auto si trovasse nella corsia corretta. Per farlo si è utilizzato il prodotto scalare tra il vettore che rappresenta l’asse X della vettura ed il vettore che si ottiene dalla differenza tra il centro del veicolo ed il punto sulla curva più vicino alla posizione del veicolo. Tale punto è determinabile mediante una funzione messa a disposizione dall’API di *Curvy Splines* che prende in input una posizione e restituisce il parametro normalizzato t sulla curva. Una volta ottenuto questo parametro è possibile mediante una funzione di interpolazione dell’API di *Curvy Splines* ottenere la posizione sulla curva corrispondente al parametro t preso in input. Quindi, dati i due vettori si può invertire la relazione del prodotto scalare per ottenere il coseno dell’angolo compreso tra la direzione dei due vettori. In particolare, tale angolo è dato dal rapporto tra il prodotto scalare ed il prodotto dei moduli dei due vettori:

$$\cos \theta = \frac{a \cdot b}{|a| \cdot |b|} \quad (4.6)$$

Se il prodotto scalare tra due vettori è positivo, i due vettori formano un angolo acuto, se il loro prodotto scalare è nullo i due vettori sono ortogonali, se infine, il prodotto scalare è negativo i due vettori formano un angolo ottuso. Dunque, se i due vettori sono allineati, il coseno dell’angolo tra essi compreso risulta zero, quindi l’auto è in corsia corretta, mentre se sono orientati in modo opposto, il coseno sarà negativo e l’auto si trova in corsia opposta. Per assegnare un colore alla linea di mezzzeria si è stabilita una distanza di riferimento per l’auto all’interno della corsia corretta. Ho individuato in 2 m una distanza al di sotto della quale il sistema abilita il gradiente di colore. In un certo istante di tempo si procede, dunque, al calcolo della distanza dell’auto dalla linea di mezzzeria e la si normalizza alla distanza di riferimento per ottenere un valore, compreso tra 0 ed 1. In caso di distanza inferiore a 2 m, mantenendo la posizione in corsia corretta si va a porre il valore normalizzato alla funzione di Unity *Evaluate* che restituisce il colore associato a tale valore. In

caso di distanza superiore a 2 m, mantenendo la posizione in corsia corretta, il colore assegnato è il verde, mentre in caso di posizione in corsia opposta, il colore assegnato è il rosso, a prescindere dalla distanza.



Figura 4.18: Linea di mezzeria.

Per quanto riguarda la realizzazione del navigatore posto sul tablet all'interno dell'auto, si è creata una camera che inquadra la scena vista dall'alto in una *Render Texture*. Per segnalare la posizione dell'auto sul navigatore si è creata una *Canvas* che renderizza l'immagine di una freccia. Per realizzare la linea di navigazione che mostra il percorso dalla partenza fino alla destinazione si è utilizzato, come riferito prima, l'asset *Curvy Splines*. In particolare si è andato a definire il percorso pianificato per l'auto tramite una curva: è stato creato un oggetto di tipo *Spline* ed i punti di controllo della curva tramite il componente *Spline Segment*. Una volta ottenuta la curva, è stato definito un *Line Renderer* per disegnarla. I punti da passare all'array del *Line Renderer* sono stati ottenuti, una volta per tutte, tramite la funzione *Interpolate*, con un passo di incremento dato dal reciproco del numero di punti di controllo della curva moltiplicato per un fattore che va a considerare un maggiore o minore grado di smussatura della curva stessa; si è scelto un valore pari a 10 che permetteva di ottenere una curva abbastanza morbida. Dopo di che, per aggiornare il disegno della linea si sono inseriti i punti del *Line Renderer*, a partire dal primo fino all'ultimo all'interno di una coda. Ad ogni frame si è, quindi, calcolata la proiezione del vettore definito dalla differenza tra il punto corrente all'interno della coda e la posizione dell'auto; se tale proiezione era minore di una soglia individuata in 0.5 m, allora si rimuoveva il punto della coda e si aggiornava il vettore del *Line Renderer* con i nuovi punti della coda. In questa maniera la linea del percorso, ad ogni frame, iniziava sempre in corrispondenza della posizione dell'auto.

Capitolo 5

Valutazione dell'esperienza utente e risultati

Una volta progettati gli elementi necessari a realizzare l'esperienza di guida autonoma, è stato possibile procedere ad effettuare la fase di testing dell'interfaccia. Ai fini del test si è deciso di considerare lo scenario urbano e di escludere quello extraurbano. Tale decisione è stata presa sulla base di diverse ragioni. In primo luogo, effettuando dei test preliminari in ambiente urbano è risultato che le capacità decisionali dell'auto risultavano già evidenti, grazie alle differenti situazioni che la tipologia di scenario ha permesso di innescare; inoltre, le informazioni mostrate dall'interfaccia omnicomprensiva e da quella selettiva riuscivano a suscitare sensazioni differenti nelle persone. Per contro, le due interfacce adoperate nel contesto extraurbano non risultavano particolarmente differenti l'una dall'altra a causa del ridotto numero di elementi e situazioni inclusi in tale ambiente. Per tale motivo, il confronto tra un'interfaccia sperimentata nell'ambiente urbano ed un'altra sperimentata nell'ambiente extraurbano non sarebbe stato significativo. Inoltre, sempre da test preliminari è emerso che una simulazione in realtà virtuale basata su entrambi gli scenari induceva "motion sickness". Questo fenomeno si manifesta con diverse sensazioni di malessere che potrebbero portare la persona a perdere la concentrazione nell'esperienza virtuale, rendendo, dunque, i test poco significativi. Si è, dunque, stabilito a seguito di queste motivazioni, che lo scenario urbano fosse adeguato allo scopo dell'obiettivo di tesi. Inoltre, si è deciso di utilizzare come posizione di testing quella di passeggero: in questa maniera l'utente può sperimentare come sarebbe un'esperienza a bordo di un'auto col massimo grado di autonomia, in cui il ruolo della persona a bordo è quello di "spettatore". Per farlo, però, è stato opportuno rimuovere il volante: se l'utente lo avesse toccato nel mondo reale avrebbe percepito una riduzione del senso di presenza visto che il corrispondente oggetto, nel mondo virtuale, in posizione di passeggero, non ci sarebbe stato.

5.1 Fase di testing dell'esperienza utente

S è, dunque, iniziata la fase di valutazione dell'esperienza utente. A tale scopo si è considerato un campione di 30 soggetti, 22 di sesso maschile ed 8 di sesso

femminile, tutti studenti o ex studenti universitari con un’età compresa tra 18 e 33 anni. Il numero di partecipanti che ha provato un tipo di interfaccia è stato uguale al numero di partecipanti che ha provato l’altra, perciò 15 tester hanno sperimentato l’interfaccia omnicomprensiva e gli altri 15 quella selettiva. La fase di test è iniziata per ciascun utente con una breve spiegazione dell’esperienza a cui questi stava per partecipare: il soggetto è venuto a conoscenza del fatto che avrebbe indossato un caschetto di realtà virtuale ed, in qualità di passeggero, si sarebbe trovato a bordo di un’auto con il massimo grado di autonomia che avrebbe guidato all’interno di un tipico scenario urbano; quindi, sul parabrezza dell’auto sarebbero mostrate delle informazioni di contesto stradale, tramite il sistema AR-HUD del quale è stata data una spiegazione a parole ed una spiegazione visiva, tramite video. A questo punto, l’utente è stato invitato a compilare la prima parte di un questionario di valutazione in cui sono poste domande personali e sul suo stato di salute prima dell’esperienza. Una volta risposto a queste domande, l’utente si è potuto sedere sul sedile della piattaforma di movimento ed indossare il visore. Si è, dunque, scelta un’interfaccia, ad esempio quella omnicomprensiva, ed è iniziata la simulazione. Al termine della stessa, l’utente è stato invitato a compilare la seconda parte del questionario di valutazione.

5.2 Questionario di valutazione

Per la valutazione dell’esperienza utente si è preparato un questionario che si propone di valutare:

- stato di salute prima e dopo la simulazione;
- simulazione in realtà virtuale;
- simulazione di guida autonoma;
- interfaccia uomo-macchina;
- fiducia.

La valutazione dello stato di salute è stata fatta per capire se, in seguito alla simulazione, il soggetto abbia o meno sperimentato “motion sickness” ed in che misura. Il malessere infatti, impatterebbe in maniera negativa sull’esperienza, portando l’utente a concentrarsi sul suo stato fisico piuttosto che sulla simulazione. Per tale valutazione si è utilizzato il questionario “Simulator Sickness Questionnaire” (SSQ) [68]. Le domande relative alla simulazione in realtà virtuale sono state, invece, volte a valutare il grado di bontà della simulazione. Infatti, in caso di simulazione ritenuta dai partecipanti poco fedele alla realtà i risultati sulla valutazione dell’interfaccia e sulla fiducia avrebbero perso significatività. In merito alla valutazione della simulazione si sono usate alcune sezioni del VRUSE, un questionario utilizzato per valutare l’usabilità di un sistema in realtà virtuale in base all’atteggiamento ed alla percezione dell’utente [69]. In particolare, si sono considerate la sezione relativa alla fedeltà della simulazione, che va a valutare quanto l’esperienza all’interno della

realtà sintetizzata sia stata simile ad una analoga nel mondo reale e quella relativa al senso di immersione/presenza, ovvero la percezione che l’utente ha di trovarsi fisicamente in un mondo non reale. Proseguendo, si è valutata la simulazione di guida autonoma tramite domande tratte da un questionario usato per valutare la fiducia uomo-macchina [70]: andare a valutare quest’ultima è importante sulla base di quanto detto nella fase di progettazione; è prioritario infatti, creare prima un rapporto di fiducia con il sistema autonomo, per poi andare a valutare altri fattori, come l’interfaccia. La valutazione dell’HMI è stata fatta andando a valutare, sulla base di quanto stabilito nello stato dell’arte quelli che sono i fattori che vanno ad influenzarla ovvero la fiducia, il carico cognitivo e la consapevolezza situazionale. La fiducia è, a sua volta, influenzata dal modello mentale, informazioni di tipo *why* e competenza del sistema, in base ai fattori stabiliti da Ekman et al. [3]. Sono, pertanto, state poste domande mirate a capire quanto fossero state chiare, tramite l’interfaccia, le intenzioni e le decisioni dell’auto (modello mentale), se sia sempre stato chiaro il perché l’auto abbia effettuato una certa operazione (informazioni di tipo *why* e riguardo la percezione che il sistema autonomo abbia sempre avuto tutto sotto controllo (competenza del sistema). In seguito, si è andato a valutare l’impatto dell’interfaccia sul carico cognitivo dell’utente, basandosi sullo strumento di valutazione “NASA Task Load Index NASA-TLX” (NASA-TLX) [71]. Ancora, oggetto fondamentale dell’analisi è stata la consapevolezza situazionale. Essa è stata valutata prendendo come riferimento il questionario di autovalutazione della consapevolezza della situazione “Situation Awareness Rating Technique” (SART) [72]. In particolare, delle 10 dimensioni definite dal questionario ci si è soffermati sulla qualità e quantità delle informazioni. La qualità è intesa come utilità delle informazioni ovvero quanto la persona abbia apprezzato che tali informazioni ci fossero, ad esempio, per rendere il viaggio confortevole per qualche motivo o per farlo sentire al sicuro. La quantità si riferisce al numero di informazioni che l’interfaccia ha fornito al passeggero. Il confronto tra le due interfacce, prendendo in considerazione questi ultimi due fattori ha permesso di capire se e quali fossero le informazioni volute dall’utente se si trovasse in un’auto autonoma di livello 4 o 5 e se preferisse averne in misura maggiore o minore. In seguito alla valutazione degli aspetti riguardanti l’HMI, si è concluso il questionario con una domanda diretta riguardo la fiducia, in modo da avere una conferma di quanto ottenuto dalle risposte precedenti e delle domande finali relative ad aspetti apprezzati o poco graditi dell’esperienza.

5.3 Risultati

Si riportano, dunque, i risultati dei test utente. I grafici riportano sull’asse orizzontale media e deviazione standard delle risposte ottenute dalle 30 prove e sull’asse verticale il valore della scala di valutazione. Per mantenere coerenza con i valori della scala, le domande con accezione negativa sono state invertite e rappresentate con “(i)”. Le domande che hanno ottenuto significatività statistica sono state contrassegnate con “*”. La significatività statistica è stata stabilita mediante t-test con $p\text{-value} < 0.05$. Per quanto riguarda la familiarità con strumenti di realtà virtuale e con simulatori di guida, la maggior parte dei partecipanti ha avuto poca o nulla

esperienza, infatti, circa l'80% dei partecipanti non ha mai avuto a che fare o ha usato raramente tali strumenti.

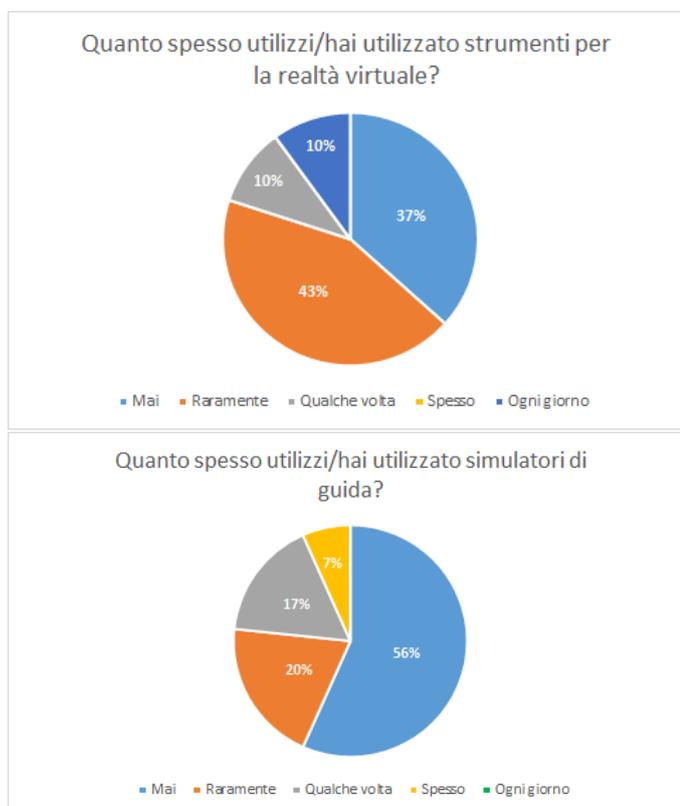


Figura 5.1: Domande Personali

Le risposte relative alla sintomatologia post-simulazione mostrano che i partecipanti hanno sperimentato un lieve stato di "motion sickness" che si è manifestata con un incremento della sensazione di malessere, nausea in particolare, sudorazione e fastidio allo stomaco. In ogni caso le medie si assestano al di sotto del valore "lievemente" della scala di valutazione.

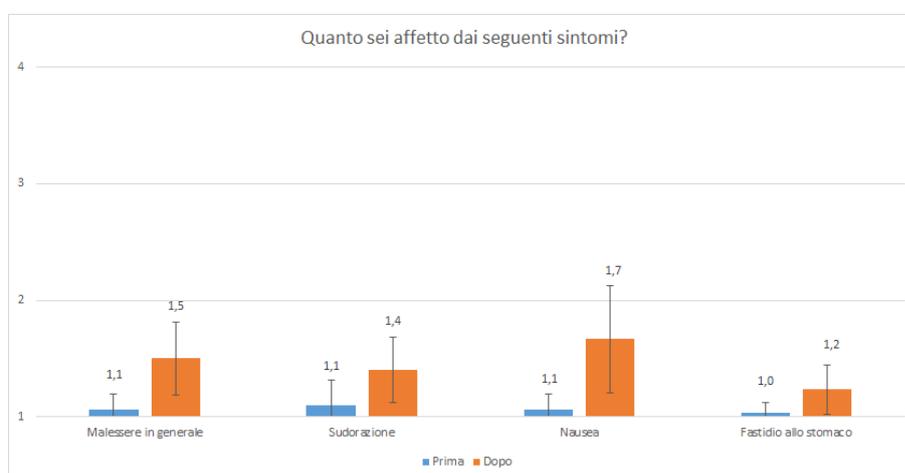


Figura 5.2: Stato di salute prima e dopo la simulazione.

Dalle risposte relative al VRUSE si evince come i partecipanti abbiano sperimentato un buon senso di immersione e presenza ed abbiano ritenuto che la simulazione fosse abbastanza fedele.

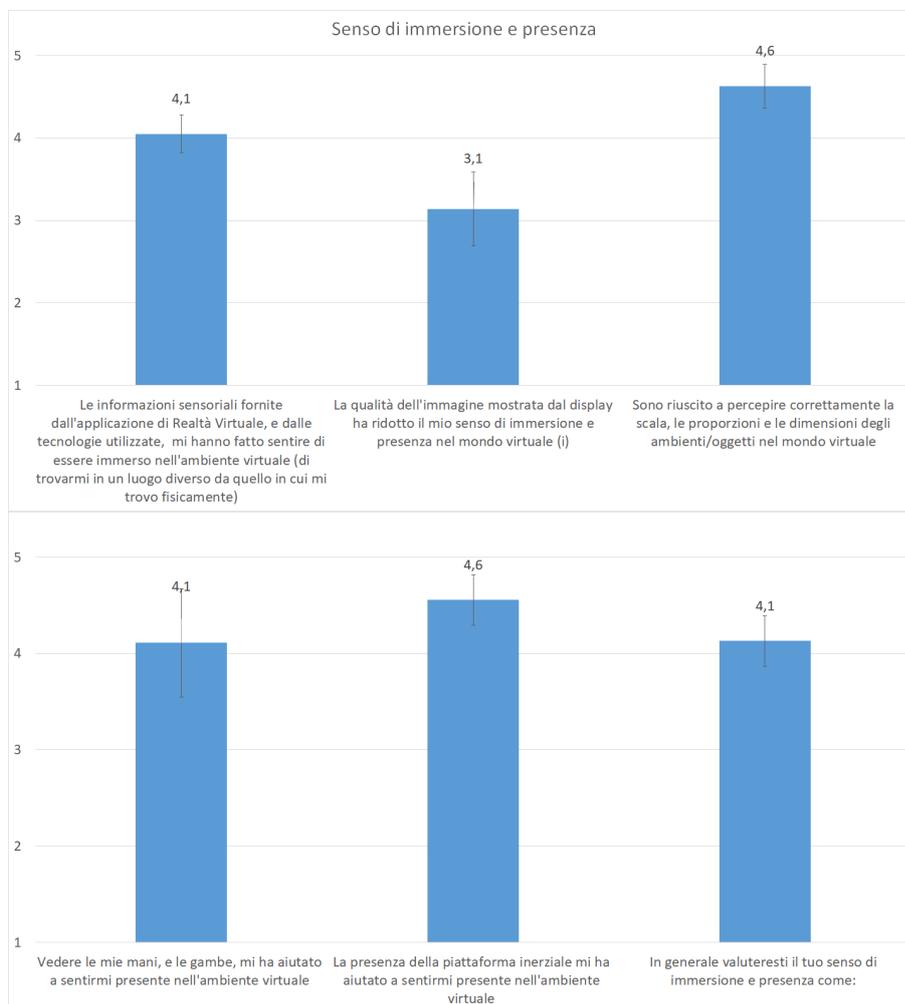


Figura 5.3: Immersione e presenza.

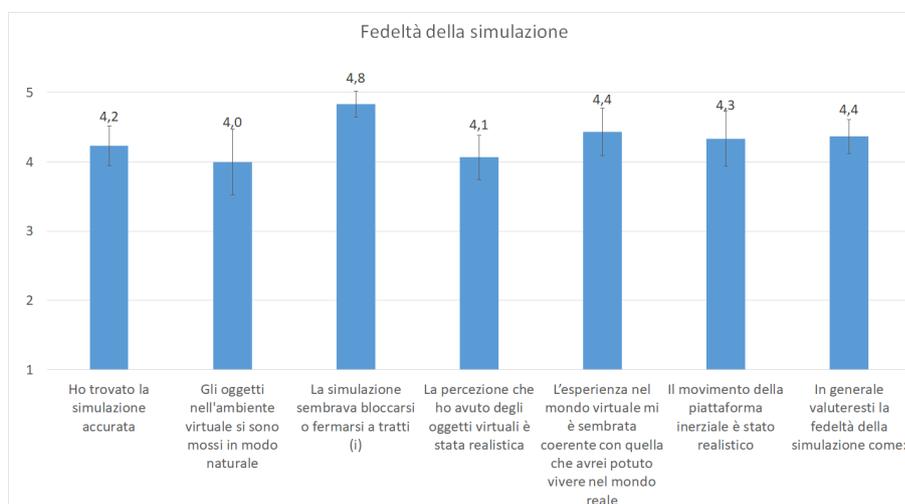


Figura 5.4: Fedeltà della simulazione.

Anche per quanto concerne la simulazione di guida autonoma i soggetti hanno espresso valutazioni molto positive.

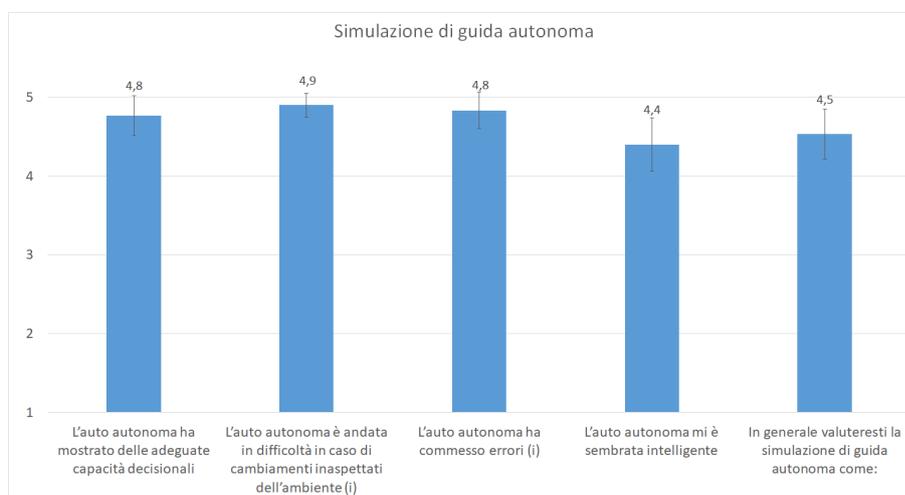


Figura 5.5: Simulazione di guida autonoma.

I risultati ottenuti, in generale, dalla valutazione sulla simulazione in realtà virtuale, sono positivi. Questo mostra che si è stati in grado tramite la simulazione virtuale di far sì che l'utente si sentisse coinvolto nell'esperienza, quindi percepisse di trovarsi a bordo di un'auto autonoma che guida all'interno di uno scenario urbano. Inoltre, il fatto che la simulazione di guida sia stata apprezzata è indice del fatto che l'auto è stata in grado di prendere adeguate capacità decisionali valutando correttamente le situazioni di guida e cercando di non commettendo errori. Tali risultati rappresentano la base per poter creare un iniziale rapporto di fiducia con l'auto in base a quanto detto da Lee & Moray [51]. Quindi, si va a valutare l'interfaccia utente.

In primo luogo si considera il modello mentale. Le risposte mostrano che entrambe le versioni, omnicomprensivo e selettivo rendono all'utente abbastanza chiare le intenzioni e le decisioni dell'auto. Quest'ultima è stata in grado di comunicare, tramite l'informazione, l'intenzione di fermarsi ad un semaforo ad esempio, di reagire ad un ostacolo o decelerare in presenza di un limite di velocità. In alcune situazioni come la presa in considerazione di un veicolo che influenza la guida dell'auto e l'applicazione delle regole di precedenza l'interfaccia selettiva si è mostrata più chiara. Quindi, il fatto di mostrare soltanto informazioni rilevanti alla situazione di guida ha permesso al passeggero di comprendere meglio determinati comportamenti dell'auto autonoma.

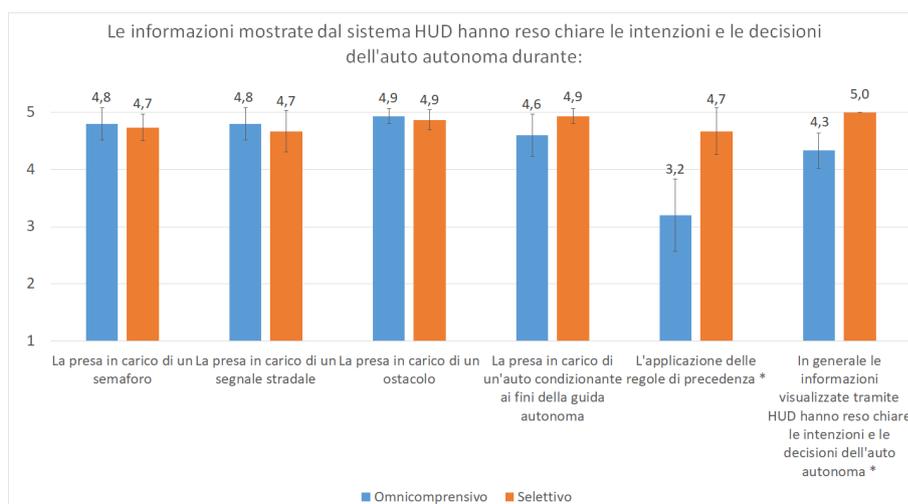
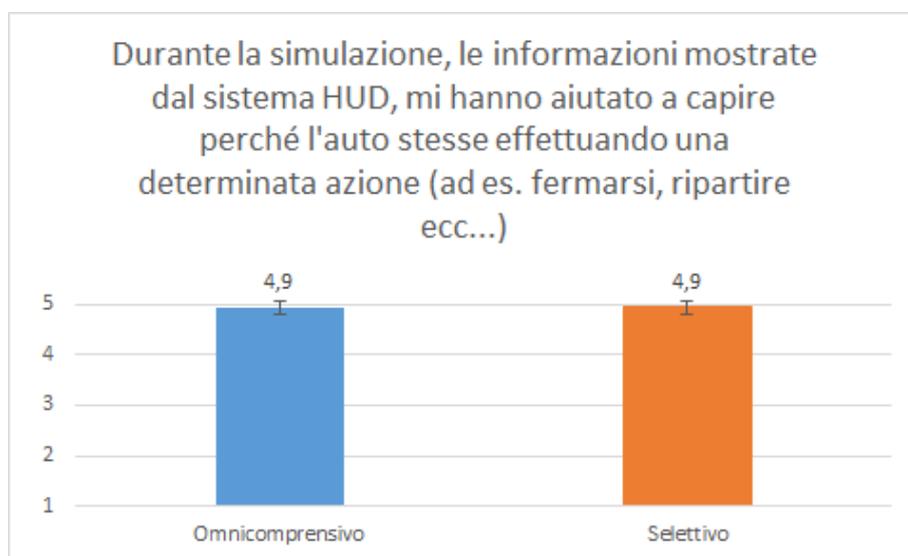


Figura 5.6: Modello mentale.

Relativamente alle informazioni di tipo *Why*, i risultati si rivelano uguali per entrambe le interfacce; sia l'una che l'altra sono state in grado di far comprendere all'utente la ragione per cui l'auto abbia compiuto una determinata azione. Questa tipologia di informazione non è cambiata in numero fra una variante di display e l'altra, pertanto, si può ritenere che l'informazione sia stata ben rappresentata e fornita al momento opportuno per fare capire all'utente la prossima azione dell'auto.

Figura 5.7: Informazioni di tipo *Why*.

Considerando la competenza del sistema, i risultati sono stati uguali; entrambe le interfacce hanno dato all'utente la sensazione di tenere tutto sotto controllo. È rilevante, però, notare che sebbene l'HUD selettivo fornisse meno informazioni, esso si è mostrato competente all'utente allo stesso modo dell'omnicomprensivo.

I risultati riguardo il carico cognitivo, mostrano che, l'interfaccia omnicomprensiva ha richiesto un impegno mentale maggiore per l'utente e che le informazioni mostrate in quest'ultima sono risultate tendenzialmente neutrali, ovvero né apprezzate né ritenute fastidiose. Per contro, l'interfaccia selettiva oltre a richiedere un

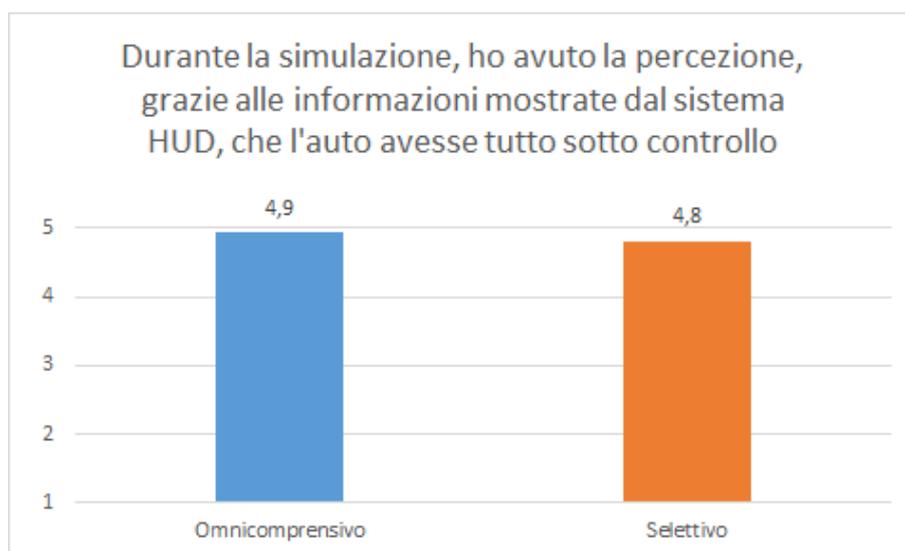


Figura 5.8: Competenza del sistema.

minor carico cognitivo ha ricevuto più apprezzamenti, probabilmente giustificabili dal fatto che l'informazione era comunicata all'utente in circostanze opportune e non in maniera costante, rendendolo incline ad accettarla senza percepire un senso di fastidio.

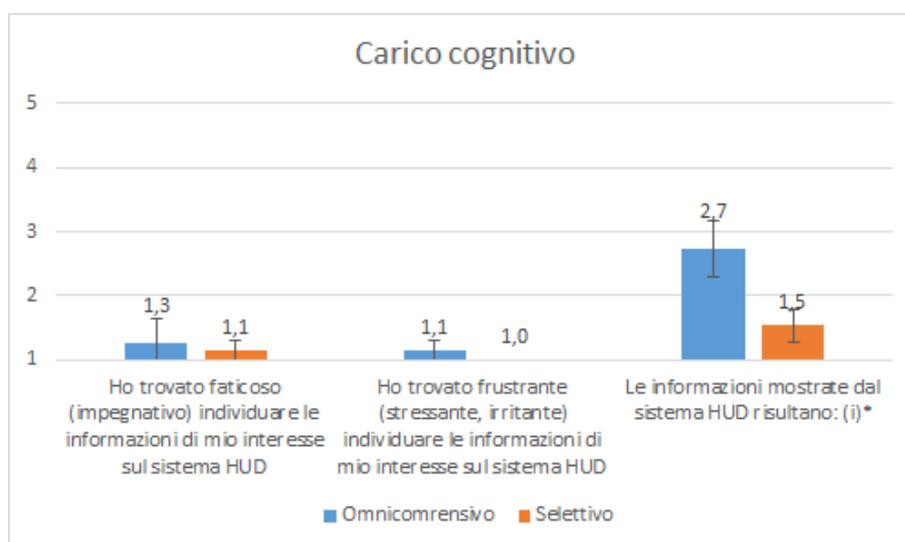
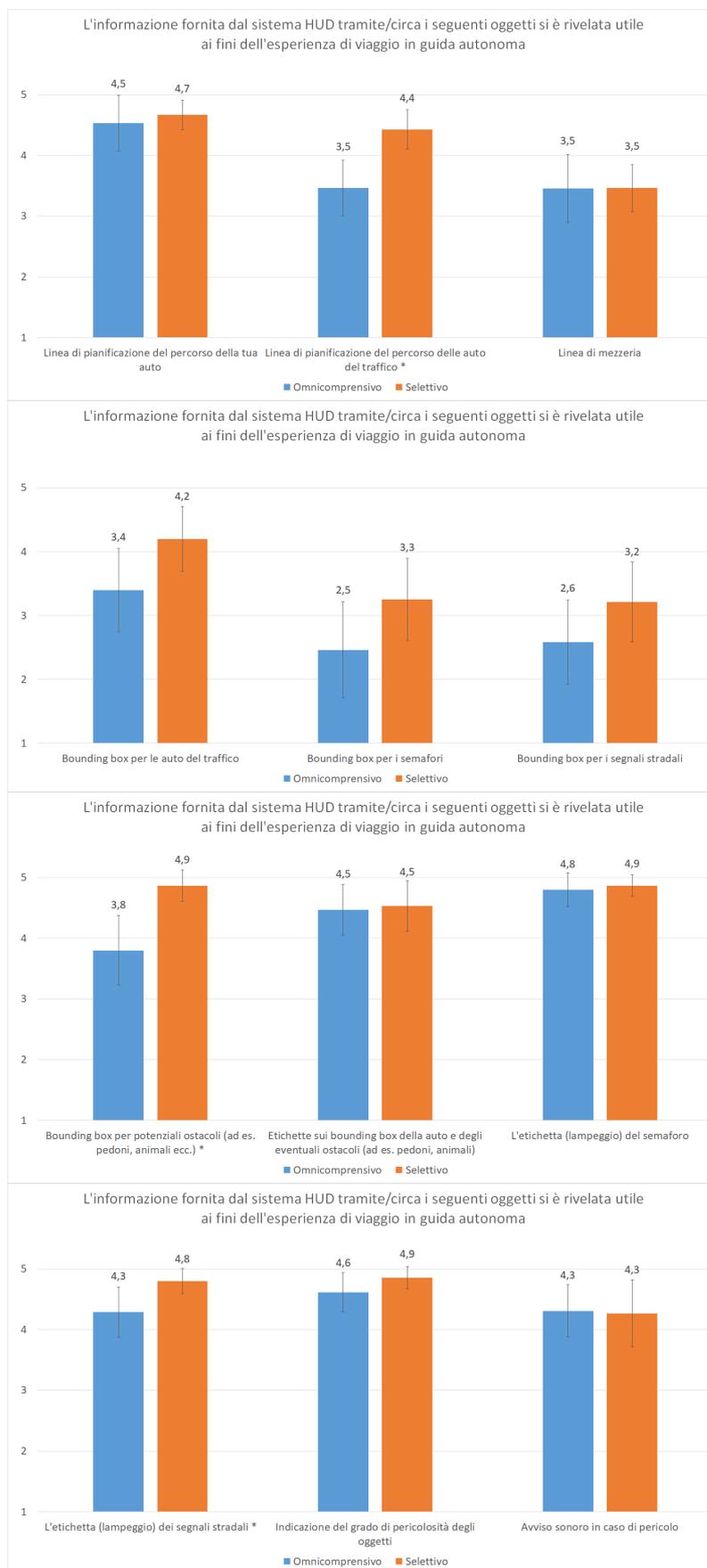


Figura 5.9: Carico cognitivo.

Per quanto riguarda la consapevolezza della situazione, in termini di qualità delle informazioni i risultati mostrano che, complessivamente sia l'interfaccia completa che quella selettiva sono riuscite a dare una buona consapevolezza della situazione, con un leggero vantaggio per l'HMI selettiva. Nello specifico, la linea di pianificazione del percorso dell'auto autonoma è stata apprezzata in entrambi i casi, quella degli altri veicoli che risulta, statisticamente significativa, invece, ha riscontrato una netta preferenza nell'interfaccia selettiva dove è risultata abbastanza utile mentre è stata leggermente utile nell'interfaccia totale. La linea di mezzzeria non ha riscosso notevole apprezzamento in entrambi i casi, essendo ritenuta anch'essa leggermente

utile. L’informazione relativa ai *bounding box* associati alle auto del traffico ha trovato una discreta utilità nell’interfaccia selettiva mentre ha perso valore in quella completa. I *bounding box* relativi ai semafori e ai segnali stradali sono risultati, in generale, poco graditi e nell’HMI completa tendenzialmente inutili, in quanto ritenuti spesso ridondanti dai partecipanti. Per contro, le relative etichette, significative statisticamente nel caso dei segnali stradali sono state molto apprezzate in entrambe le interfacce. Esse infatti comunicavano tramite l’esecuzione del lampeggio un’informazione di *why* ovvero il motivo che ha portato l’auto a fermarsi, ad esempio in caso di semaforo rosso o a decelerare in presenza di un limite di velocità. Tale informazione è importante in quanto contribuisce alla formazione della fiducia uomo-macchina. Ha trovato notevole apprezzamento anche l’indicazione del grado di pericolosità degli oggetti sia visiva, tramite la variazione del colore del *bounding box*, che uditiva, tramite l’avviso sonoro: anch’essa rappresenta un’informazione di *why* in quanto comunica all’utente che l’auto ha preso in considerazione l’ostacolo ed ha intenzione di gestirlo. L’apprezzamento è giustificato anche dal fatto che un’interfaccia multimodale, ovvero che dia feedback rivolto a più canali sensoriali è una buona prassi nella progettazione dell’HMI. Proseguendo, le etichette associate ai potenziali ostacoli nell’ambiente sono state ritenute abbastanza utili in entrambe le interfacce. Molti partecipanti hanno ritenuto di volerle non solo per gli oggetti nell’ambiente che diventano ostacoli ma per tutti gli oggetti che l’auto fosse in grado di “rilevare”. Differente è, invece, il caso del *bounding box* per tali oggetti. Nell’HMI selettiva tale informazione è stata ritenuta decisamente utile in quanto è stata fornita nel momento in cui l’oggetto diventava un ostacolo. Nel caso omnicomprendivo l’informazione era comunicata per ogni elemento dell’ambiente che veniva tracciato, ed è stato ritenuto poco utile da molti tester fornire tale informazione anche per elementi che non sono in alcuna misura coinvolti nella situazione di guida dell’auto autonoma. È rilevante, poi, soffermarsi sull’avviso sonoro in caso di presa in carico di un segnale: esso è stato reputato tendenzialmente utile nel display completo ed utile nel selettivo. Tuttavia, nella prima interfaccia è stato percepito da due persone, mentre nella seconda è stato percepito da dieci persone. Questo può essere spiegato col fatto che in presenza di un numero di informazioni maggiore è difficile percepire le variazioni: l’utente è stato impegnato ad elaborare l’informazione presente e non è riuscito a percepire l’informazione di presa in considerazione del segnale. Nell’interfaccia selettiva, essendo l’informazione data al momento opportuno, l’utente non deve elaborare una quantità di informazioni in maniera costante pertanto il suo impegno mentale è più basso e riesce a percepire meglio le variazioni nell’ambiente, in questo caso, la comunicazione di un avviso sonoro. Inoltre, è stata ritenuta molto utile in entrambe le varianti di display anche la linea di navigazione posta sul tablet centrale: gli utenti l’hanno ritenuta utile perché ha permesso loro di conoscere in anticipo una buona parte del percorso che l’auto avrebbe seguito per giungere alla destinazione.

5 – Valutazione dell'esperienza utente e risultati



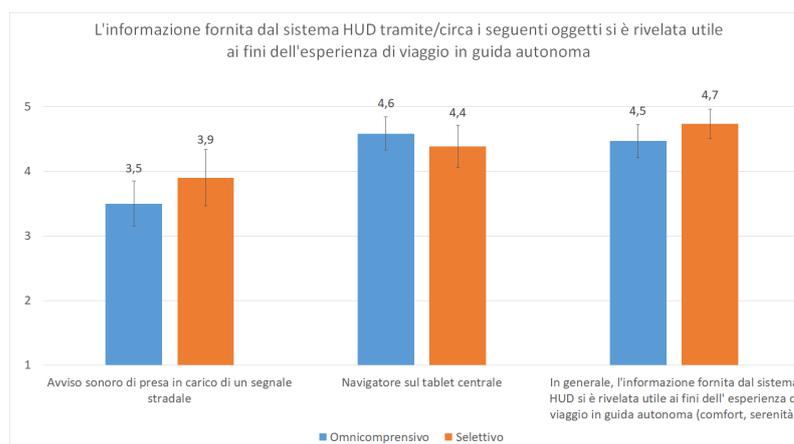


Figura 5.10: Qualità delle informazioni.

Proseguendo, l'altro parametro fondamentale di analisi della consapevolezza situazionale è la quantità di informazioni. In generale, si osserva un vantaggio del sistema selettivo in quanto l'informazione fornita è risultata adeguata in quasi tutti i casi. Per contro, si nota una tendenza all'eccesso per la variante omnicomprensiva. Questo suggerisce che, complessivamente, l'utente a bordo di un'auto completamente autonoma vuole sì avere consapevolezza della situazione, ma in misura minore rispetto a quella che otterrebbe dal sistema completo. Sono presenti risultati statisticamente significativi in molte risposte come quella relativa alle traiettorie delle auto del traffico, i relativi *bounding box* ed etichette, i *bounding box* associati alla segnaletica stradale e semaforica e quelli relativi a possibili ostacoli nell'ambiente, e le etichette relative a questi ultimi. Le linee di pianificazione del percorso delle altre auto sono state ritenute eccessive nel caso omnicomprensivo da più utenti per via del fatto che l'informazione circa l'applicazione delle regole di precedenza non è stata chiara e perché sono risultate a volte confusionarie. Si può notare ancora come, i *bounding box* relativi alla segnaletica stradale e semaforica, già poco apprezzati in termini di utilità siano stati ritenuti eccessivi nel caso del display completo. Per quanto riguarda le etichette invece, si può affermare che essendo queste state, in generale, ritenute utili come tipo di informazione risultano nell'HUD omnicomprensivo, comunque, meno eccessive rispetto ai *bounding box*. Ancora, si può sottolineare che il fatto di modulare l'informazione relativa ai *bounding box* delle auto del traffico sia stata una scelta apprezzata dagli utenti: comunicare l'informazione soltanto quando necessario si è rivelato migliore rispetto a fornire un feedback costante all'utente che, pertanto, ha ritenuto sovrabbondante questa informazione.

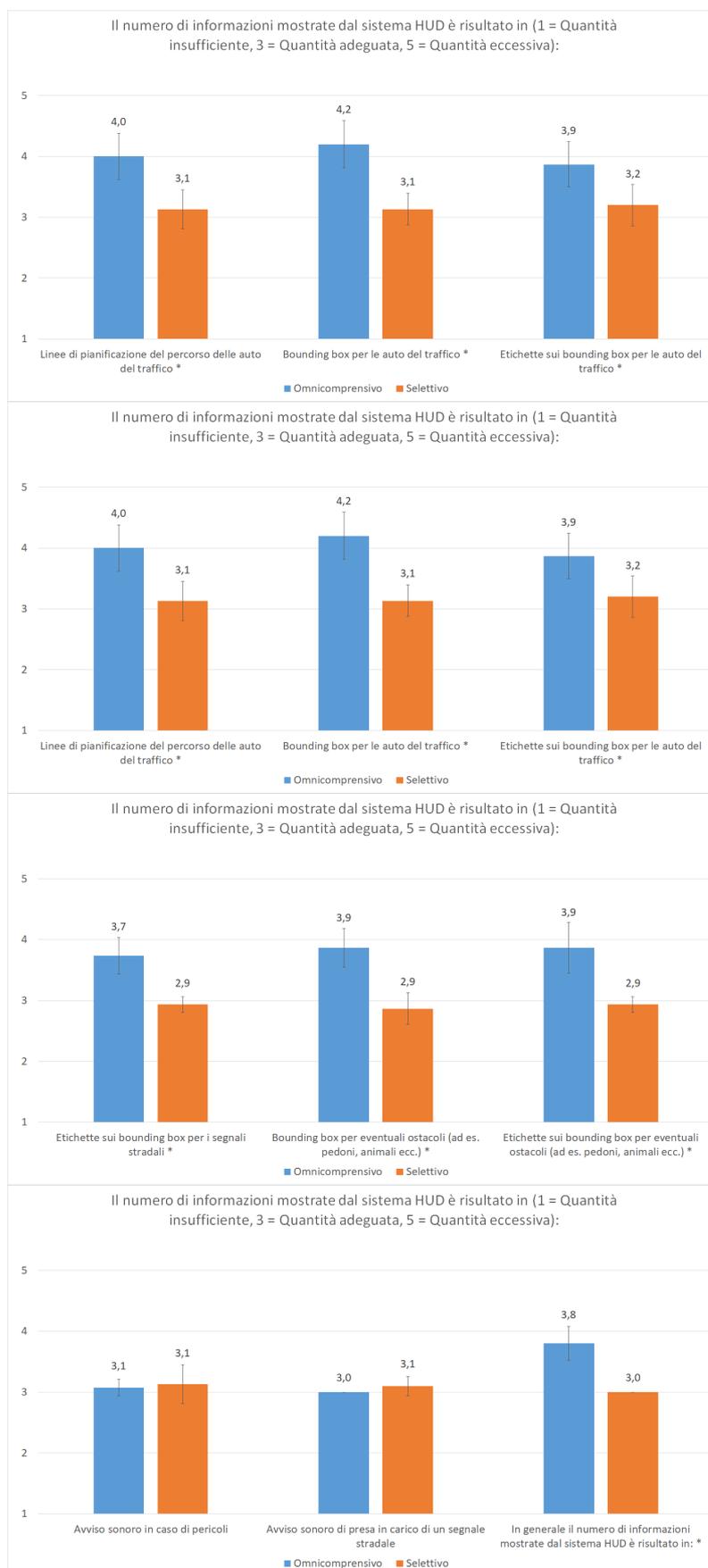


Figura 5.11: Quantità delle informazioni.

In merito alla domanda generale sulla fiducia è stato confermato, per entrambe le versioni di HUD, che l'informazione fornita dal sistema è di aiuto a stabilire la fiducia uomo-macchina.

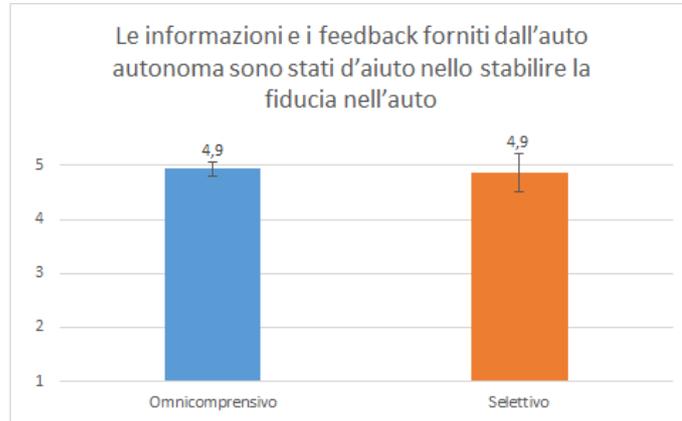


Figura 5.12: Fiducia uomo-macchina.

In conclusione la domanda posta all'inizio ed al termine del test, riguardo quanto un utente sia disposto a partecipare ad un'esperienza a bordo di un'auto a guida autonoma reale ha dato risposta positiva in entrambi i casi. In generale, i partecipanti già prima di effettuare la prova erano ben disposti nei confronti dell'auto autonoma e, una volta effettuato il test, hanno confermato l'intenzione iniziale. Si nota, però un incremento del valor medio, anche non considerando le persone che già dal principio si erano espresse col massimo favore (decisamente sì) ed il risultato è statisticamente significativo. Si può pensare, visto il risultato, di proporre l'utilizzo di una simulazione di guida autonoma in realtà virtuale come applicazione di training allo scopo di promuovere la nuova tecnologia, che da stato dell'arte è noto portare problemi in termini di fiducia delle persone e conseguente accettazione.

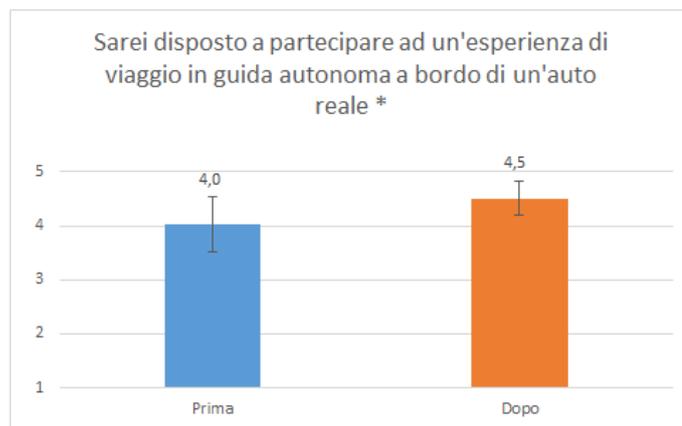


Figura 5.13: Esperienza di guida autonoma.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

6.1 Conclusioni

Lo studio effettuato ha permesso di trarre conclusioni in merito a quanta informazione riguardo la situazione di guida includere, per dare più o meno consapevolezza del contesto, in un'interfaccia utente per auto completamente autonome. I risultati hanno mostrato che, in generale, l'informazione di contesto, è stata apprezzata dall'utente che, dunque, preferirebbe comunque disporre di una qualche informazione di monitoraggio dell'ambiente da parte del sistema durante l'esperienza di viaggio a bordo dell'auto autonoma, piuttosto che non averne affatto. Questo giustifica il fatto che alcuni concept di auto completamente autonome menzionati nello stato dell'arte [13, 14, 15], hanno deciso di mantenere l'informazione di contesto stradale, tra l'altro proprio su un display di tipo AR-HUD. Anche questa scelta conferma il fatto che il sistema in realtà aumentata sia un ottimo candidato come sistema di visualizzazione nelle auto del futuro. In merito alla quantità dell'informazione di contesto è emersa una preferenza per un'informazione modulata nel tempo in base alla situazione di guida, quindi un'interfaccia di tipo selettiva, piuttosto che un'informazione fornita in maniera costante, ovvero come proposto dal display omnicomprensivo. Inoltre, un ulteriore indice che un'interfaccia selettiva possa essere la soluzione migliore è da ricercare nei risultati riguardo la fiducia. In generale, dare delle informazioni di contesto, predispone positivamente i passeggeri verso l'utilizzo di tale auto, visto che il livello di fiducia riscontrato è stato abbastanza alto. Inoltre, visto che entrambe le interfacce hanno suscitato lo stesso livello di fiducia si potrebbe preferire l'HMI che proponga soltanto le informazioni relative a ciò che sta influenzando la guida in un particolare momento, quindi quella selettiva, in modo da tenere il carico cognitivo dell'utente relativamente basso. La validità dei risultati ottenuti è giustificata dalle risposte date dagli utenti in merito alla qualità della simulazione in realtà virtuale, ritenuta più che soddisfacente e circa la qualità della simulazione di guida autonoma, anch'essa molto apprezzata. Si può concludere, dunque, che l'utilizzo di un'interfaccia selettiva che tramite AR-HUD comunichi informazioni di contesto stradale possa essere una soluzione adottabile in un'HMI per un'auto completamente autonoma visti gli apprezzamenti ricevuti e, al contempo, la sua utilità dal punto di vista della fiducia.

6.2 Sviluppi futuri

Considerando il software di simulazione GENIVI ed i relativi ambienti si potrebbero andare a realizzare altri scenari di guida, ad esempio nell'ambiente extraurbano Yosemite o, partendo da quanto realizzato nell'ambiente costiero andare ad effettuare simulazioni in circostanze di guida avverse ad esempio maltempo o scarsa visibilità. In merito allo scenario urbano si potrebbero effettuare delle misurazioni oggettive, ad esempio mediante eye tracker o monitoraggio dei parametri fisici dell'utente in modo da integrarle con le valutazioni soggettive. Inoltre, esso potrebbe essere migliorato, sulla base dei commenti fatti dai tester, andando ad agire sui veicoli del traffico, magari rendendoli più verosimili e mettendo a bordo di questi delle persone. Sarebbe opportuno anche inserire una quantità di elementi dinamici maggiore come pedoni o animali. Si potrebbe inoltre, su suggerimento di un tester, dotare l'auto della capacità di cambiare il proprio stile di guida, ad esempio da conservativo a più aggressivo. Egli ha, infatti, lamentato il fatto che in alcune situazioni avrebbe voluto prendere il controllo del mezzo perché l'auto non realizzava la sua aspettativa di guida. Proseguendo ancora sullo scenario urbano, si potrebbe, ad esempio guardare alla parte esterna dell'interfaccia dell'auto autonoma ovvero a quella che, ad esempio, dovrebbe segnalare ad un eventuale pedone che incrocia la sua traiettoria l'intenzione di fermarsi. Infatti, si pone una questione relativa all'HMI circa la sua importanza non soltanto per chi è a bordo dell'auto ma anche per chi si trova al di fuori, che deve potersi fidare delle azioni dell'auto. Una possibilità è proprio quella di progettare un'interfaccia che vada a comunicare a chi si trova all'esterno i comportamenti di guida. Considerando il display che realizza l'interfaccia, una ulteriore valutazione potrebbe riguardare il confronto con altri tipi di informazioni in un'auto completamente autonoma. In particolare, in tale tipo di auto l'utente può liberamente intrattenersi in altre attività perciò tipologie diverse di informazioni, come quelle di intrattenimento, riguardo, ad esempio, luoghi di interesse all'interno dell'ambiente, cominciano a prendere importanza. Si potrebbe, pertanto, valutare se l'utente preferirebbe disporre di tali informazioni sull'HUD, in modo da avere queste sempre visibili e lasciare quelle di contesto su un HDD come un tablet touch-screen, oppure viceversa dare più importanza alle informazioni di contesto, mantenendole sull'HUD e accedere a quelle di intrattenimento tramite un tablet. Ancora si potrebbe, come già accennato, utilizzare la realtà virtuale come strumento per realizzare applicazioni di training allo scopo di far prendere confidenza ai consumatori nella nuova tecnologia, per promuovere l'accettazione sociale delle auto autonome. Un esempio potrebbe essere quello di realizzare un concept di auto del futuro, introducendo alcuni elementi che sono stati ritenuti utili, in letteratura, per stabilire la fiducia col mezzo, ad esempio, l'uso di antroporfismo o l'introduzione di una fase iniziale di apprendimento per l'utente che si trova per la prima volta a bordo di un veicolo automatizzato.

Appendice A

Questionario di valutazione dell'esperienza utente

A.1 Domande Personali

1. Età
2. Sesso

Quanto spesso utilizzi/hai utilizzato:

- 3 Strumenti per la realtà virtuale immersiva(ad es. Oculus Rift, HTC Vive ecc.)? (mai, raramente, qualche volta, spesso, ogni giorno)
- 4 Simulatori di guida (ad es. Assetto Corsa, rFactor ecc.)? (mai, raramente, qualche volta, spesso, ogni giorno)
- 5 Sarei disposto a partecipare ad un'esperienza di guida autonoma a bordo di un' auto reale (decisamente no, no, non saprei, si, decisamente si)

A.2 Autovalutazione dello stato di salute pre-simulazione

Quanto sei affetto dai seguenti sintomi in questo momento? (per nulla, lievemente, moderatamente, intensamente)

6. Malessere in generale
7. Affaticamento
8. Mal di testa
9. Occhi affaticati
10. Difficoltà di messa a fuoco

11. Salivazione aumentata
12. Sudorazione
13. Nausea
14. Difficoltà di concentrazione
15. Visione sfocata
16. Capogiro con occhi aperti
17. Capogiro con occhi chiusi
18. Vertigini
19. Fastidio allo stomaco

A.3 Autovalutazione dello stato di salute post-simulazione

Quanto sei affetto dai seguenti sintomi in questo momento? (per nulla, lievemente, moderatamente, intensamente)

20. Malessere in generale
21. Affaticamento
22. Mal di testa
23. Occhi affaticati
24. Difficoltà di messa a fuoco
25. Salivazione aumentata
26. Sudorazione
27. Nausea
28. Difficoltà di concentrazione
29. Visione sfocata
30. Capogiro con occhi aperti
31. Capogiro con occhi chiusi
32. Vertigini
33. Fastidio allo stomaco

A.4 Senso di immersione e presenza

(completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

34. 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)
35. La qualità dell'immagine mostrata dal display ha ridotto il mio senso di immersione e presenza nel mondo virtuale
36. Sono riuscito a percepire correttamente la scala, le proporzioni e le dimensioni degli ambienti/oggetti nel mondo virtuale
37. Vedere le mie mani, e le gambe, mi ha aiutato a sentirmi presente nell'ambiente virtuale
38. La presenza della piattaforma inerziale mi ha aiutato a sentirmi presente nell'ambiente virtuale
39. 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)?

A.5 Fedeltà della simulazione

(completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

40. Ho trovato la simulazione accurata
41. Gli oggetti nell'ambiente virtuale si sono mossi in modo naturale
42. La simulazione sembrava bloccarsi o fermarsi a tratti
43. La percezione che ho avuto degli oggetti virtuali è stata realistica
44. L'esperienza nel mondo virtuale mi è sembrata coerente con quella che avrei potuto vivere nel mondo reale
45. Il movimento della piattaforma inerziale è stato realistico
46. In generale valuteresti la fedeltà della simulazione come: per nulla soddisfacente, poco soddisfacente, mediamente soddisfacente, soddisfacente, molto soddisfacente?

A.6 Valutazione della simulazione di guida autonoma

(completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

47. L'auto autonoma ha mostrato delle adeguate capacità decisionali
48. L'auto autonoma è andata in difficoltà in caso di cambiamenti inaspettati dell'ambiente
49. L'auto autonoma ha commesso errori
50. Quali? (risposta aperta)
51. L'auto autonoma mi è sembrata intelligente
52. In generale valuteresti la simulazione di guida autonoma come: per nulla soddisfacente, poco soddisfacente, mediamente soddisfacente, soddisfacente, molto soddisfacente?

A.7 Valutazione dell'interfaccia HUD

In questa sezione vogliamo valutare in generale quanta l'interfaccia (display HUD) sia stata efficace dal punto di vista dell'utilità e della fiducia. Le domande riguarderanno fattori rilevanti nello studio dell'HMI (human-machine interface).

53. Quale versione di HUD hai testato?
 - (a) HUD omnicomprensivo
 - (b) HUD selettivo

A.7.1 Modello mentale

Le informazioni mostrate dal sistema HUD hanno reso chiare le intenzioni e le decisioni dell'auto autonoma durante: (completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

54. La presa in carico di un semaforo
55. La presa in carico di un segnale stradale
56. La presa in carico di un ostacolo
57. La presa in carico di un'auto condizionante ai fini della guida autonoma
58. L'applicazione delle regole di precedenza

59. In circostanze diverse da quelle appena menzionate, pensi che le intenzioni dell'auto autonoma siano state poco chiare?
60. In quali circostanze? (risposta aperta)
61. In generale le informazioni visualizzate tramite HUD hanno reso chiare le intenzioni e le decisioni dell'auto autonoma

A.7.2 Informazioni di tipo Why

62. Durante la simulazione, le informazioni mostrate dal sistema HUD, mi hanno aiutato a capire perché l'auto stesse effettuando una determinata azione (ad es. fermarsi, ripartire ecc...) (completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

A.7.3 Competenza del sistema

63. Durante la simulazione, ho avuto la percezione, grazie alle informazioni mostrate dal sistema HUD, che l'auto avesse tutto sotto controllo (completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

A.7.4 Carico cognitivo

(completamente in disaccordo, in disaccordo, né in disaccordo né d'accordo, d'accordo, completamente d'accordo)

64. Ho trovato faticoso (impegnativo) individuare le informazioni di mio interesse sul sistema HUD
65. Ho trovato frustrante (stressante, irritante) individuare le informazioni di mio interesse sul sistema HUD
66. Le informazioni mostrate dal sistema HUD risultano (1 = decisamente fastidiose, 2 = fastidiose, 3 = ne fastidiose ne gradevoli, 4 = gradevoli, 5 = decisamente gradevoli)

A.8 Consapevolezza della situazione

A.8.1 Qualità delle informazioni

L'informazione fornita dal sistema HUD tramite/circa i seguenti oggetti si è rivelata utile ai fini dell'esperienza di viaggio in guida autonoma: (decisamente inutile, inutile, né inutile né utile, utile, decisamente utile)

67. Linea di pianificazione del percorso della tua auto
68. Linea di pianificazione del percorso delle auto del traffico
69. Linea di mezzeria
70. Bounding box per le auto del traffico
71. Bounding box per i semafori
72. Bounding box per i segnali stradali
73. Bounding box per potenziali ostacoli (ad es. pedoni, animali ecc.)
74. Etichette sui bounding box della auto e degli eventuali ostacoli (ad es. pedoni, animali)
75. L'etichetta (lampeggio) del semaforo
76. L'etichetta (lampeggio) dei segnali stradali
77. Indicazione del grado di pericolosità degli oggetti
78. Avviso sonoro in caso di pericolo
79. Avviso sonoro di presa in carico di un segnale stradale
80. Navigatore sul tablet centrale
81. In generale, l'informazione fornita dal sistema HUD si è rivelata utile ai fini dell'esperienza di viaggio in guida autonoma (comfort, serenità)

A.8.2 Quantità delle informazioni

Il numero di informazioni mostrate dal sistema HUD e risultato in: (quantità insufficiente, quantità adeguata, quantità eccessiva)

82. Linee di pianificazione del percorso delle auto del traffico
83. Bounding box per le auto del traffico
84. Etichette sui bounding box per le auto del traffico
85. Bounding box per i semafori
86. Etichette sui bounding box per i semafori (lampeggio)
87. Bounding box per i segnali stradali
88. Etichette sui bounding box per i segnali stradali
89. Bounding box per eventuali ostacoli (ad es. pedoni, animali ecc.)
90. Etichette sui bounding box per eventuali ostacoli (ad es. pedoni, animali ecc.)

91. Avviso sonoro in caso di pericoli
92. Avviso sonoro di presa in carico di un segnale stradale
93. In generale il numero di informazioni mostrate dal sistema HUD è risultato in:

A.9 Fiducia

94. Le informazioni e i feedback forniti dall'auto autonoma sono stati d'aiuto nello stabilire la fiducia nell'auto (decisamente inutile, inutile, né inutile né utile, utile, decisamente utile)

A.10 Domande Finali

95. Elenca tre aspetti positivi e tre aspetti negativi relativi all'esperienza appena vissuta (risposta aperta)
96. Dopo questa esperienza, sarei disposto a partecipare ad un'esperienza di viaggio in guida autonoma a bordo di un'auto reale (decisamente no, no, non saprei, si, decisamente si)

Bibliografia

- [1] iQ Intel Italy, <https://iq.intel.it/fiducia-e-guida-autonoma-come-ottenere-la-fiducia-delle-persone-trasportate/>.
- [2] M. Cunningham and M. Regan, “Autonomous vehicles: human factors issues and future research,” in *Australasian Road Safety Conference, 1st, 2015, Gold Coast, Queensland, Australia*, 2015.
- [3] F. Ekman, M. Johansson, and J. Sochor, “Creating appropriate trust in automated vehicle systems: A framework for hmi design,” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 48, no. 1, pp. 95–101, Feb 2018.
- [4] 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)*, Oct 2017, pp. 2631–2636.
- [5] Redazione Auto, <https://red-live.it/auto/livelli-guida-autonoma/>.
- [6] S. D. Pendleton, H. Andersen, X. Du, X. Shen, M. Meghjani, Y. H. Eng, D. Rus, and M. H. Ang, “Perception, planning, control, and coordination for autonomous vehicles,” *Machines*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [7] S. Cosimi, <https://www.automobile.it/magazine/mobilita-sostenibile/self-driving-cars-1677>.
- [8] L. Ferro, <https://www.01net.it/auto-guida-autonoma-regole/>.
- [9] V. Panzeri, <https://www.quotidiano.net/tech/auto-guida-autonoma-1.3828521>.
- [10] A. Dutto, <http://motori.corriere.it/motori/attualita/cards/auto-guida-autonoma-che-punto-siamo/a-che-punto-siamo.shtml>.
- [11] N. D. Turi, http://motori.corriere.it/motori/attualita/17_febbraio_03/guida-assistita-bmw-meglio-tesla-a6f8b850-e9e4-11e6-8b81-a4f26cf6fdb4.shtml.
- [12] A. Marino, <https://tech.everyeye.it/notizie/le-auto-guida-autonoma-spaventano-gli-utenti-lo-rivela-uno-studio-331232.html>.
- [13] NewsAuto, <https://www.newsauto.it/volvo/guida-autonoma-volvo-360c-2018-164661/>.
- [14] alVOLante, <https://www.alvolante.it/news/volkswagen-sedric-concept-350489>.
- [15] H. Drezet and S. Colombel, “62-1: Invited paper: Hmi concept for autonomous car,” *SID Symposium Digest of Technical Papers*, vol. 49, no. 1, pp. 815–818. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sdtp.12277>
- [16] J. D. Lee and K. A. See, “Trust in automation: Designing for appropriate reliance,” *Human Factors*, vol. 46, no. 1, pp. 50–80, 2004, pMID: 15151155. [Online]. Available: https://doi.org/10.1518/hfes.46.1.50_30392

-
- [17] D. Harrison McKnight and N. L. Chervany, “Trust and distrust definitions: One bite at a time,” in *Trust in Cyber-societies*, R. Falcone, M. Singh, and Y.-H. Tan, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, pp. 27–54.
- [18] H. Atoyán, J.-R. Duquet, and J.-M. Robert, “Trust in new decision aid systems,” in *Proceedings of the 18th Conference on L’Interaction Homme-Machine*, ser. IHM ’06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 115–122. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1132736.1132751>
- [19] K. A. Hoff and M. Bashir, “Trust in automation: Integrating empirical evidence on factors that influence trust,” *Human Factors*, vol. 57, no. 3, pp. 407–434, 2015, pMID: 25875432. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0018720814547570>
- [20] R. C. Mayer, J. H. Davis, and F. D. Schoorman, “An integrative model of organizational trust,” *The Academy of Management Review*, vol. 20, no. 3, pp. 709–734, 1995. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/258792>
- [21] J. Lee, N. Kim, C. Imm, B. Kim, K. Yi, and J. Kim, “A question of trust: An ethnographic study of automated cars on real roads,” in *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, ser. Automotive’UI 16. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 201–208. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/3003715.3005405>
- [22] F. M. F. Verberne, J. Ham, and C. J. H. Midden, “Trust in smart systems: Sharing driving goals and giving information to increase trustworthiness and acceptability of smart systems in cars,” *Human Factors*, vol. 54, no. 5, pp. 799–810, 2012, pMID: 23156624. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/0018720812443825>
- [23] J. Koo, J. Kwac, W. Ju, M. Steinert, L. Leifer, and C. Nass, “Why did my car just do that? explaining semi-autonomous driving actions to improve driver understanding, trust, and performance,” *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 9, no. 4, pp. 269–275, Nov 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s12008-014-0227-2>
- [24] R. Häuslschmid, M. von Bülow, B. Pfleging, and A. Butz, “Supporting trust in autonomous driving,” in *Proceedings of the 22Nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, ser. IUI ’17. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 319–329. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/3025171.3025198>
- [25] O. Benderius, C. Berger, and V. M. Lundgren, “The best rated human–machine interface design for autonomous vehicles in the 2016 grand cooperative driving challenge,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1302–1307, April 2018.
- [26] A. Black, <https://medium.com/sketch-app-sources/the-future-interface-of-the-automobile-ef8a0f07e895>.
- [27] F. E. M. Johansson, <https://www.saferresearch.com/library/creating-appropriate-trust-autonomous-vehicles-framework-hmi-design>.
- [28] M. Ferati, P. Murano, and G. A. Giannoumis, “Universal design of user interfaces in self-driving cars,” in *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, 2017, pp. 220–228.
- [29] S. Debernard, C. Chauvin, R. Pokam, and S. Langlois, “Designing human-machine interface for autonomous vehicles,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49,

- no. 19, pp. 609 – 614, 2016, 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316322418>
- [30] A. Doshi, S. Y. Cheng, and M. M. Trivedi, “A novel active heads-up display for driver assistance,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, vol. 39, no. 1, pp. 85–93, Feb 2009.
- [31] Z. Medenica, A. L. Kun, T. Paek, and O. Palinko, “Augmented reality vs. street views: A driving simulator study comparing two emerging navigation aids,” in *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, ser. MobileHCI '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 265–274. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2037373.2037414>
- [32] S. F. M. Alfalah, J. F. M. Falah, T. Alfalah, M. Elfalah, N. Muhaidat, and O. Falah, “A comparative study between a virtual reality heart anatomy system and traditional medical teaching modalities,” *Virtual Reality*, Jul 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0359-y>
- [33] S. Kim and A. K. Dey, “Simulated augmented reality windshield display as a cognitive mapping aid for elder driver navigation,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ser. CHI '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 133–142. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1518701.1518724>
- [34] R. Jose, G. A. Lee, and M. Billinghurst, “A comparative study of simulated augmented reality displays for vehicle navigation,” in *Proceedings of the 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction*, ser. OzCHI '16. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 40–48. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/3010915.3010918>
- [35] R. Haeuslschmid, L. Schnurr, J. Wagner, and A. Butz, “Contact-analog warnings on windshield displays promote monitoring the road scene,” in *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, ser. AutomotiveUI '15. New York, NY, USA: ACM, 2015, pp. 64–71. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2799250.2799274>
- [36] B.-J. Park, J.-W. Lee, C. Yoon, and K.-H. Kim, “Augmented reality for collision warning and path guide in a vehicle,” in *Proceedings of the 21st ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, ser. VRST '15. New York, NY, USA: ACM, 2015, pp. 195–195. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2821592.2821646>
- [37] H. T. Zwahlen, “Driver eye scanning, the information acquisition process and sophisticated in-vehicle information displays and controls,” in *Proceedings of the 9th Congress of the International Ergonomics Association*. Taylor & Francis, 1985, pp. 508–510.
- [38] J. A. Sánchez, L. Pozueco, X. G. Pañeda, A. G. Tuero, D. Melendi, and R. García, “Incorporation of head-up display devices in real-vehicular environments to improve efficiency in driving,” in *Proceedings of the XVII International Conference on Human Computer Interaction*, ser. Interacción '16. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 10:1–10:2. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2998626.2998637>

- [39] H. Kim, A. Miranda Anon, T. Misu, N. Li, A. Tawari, and K. Fujimura, “Look at me: Augmented reality pedestrian warning system using an in-vehicle volumetric head up display,” in *Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces*, ser. IUI '16. New York, NY, USA: ACM, 2016, pp. 294–298. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/2856767.2856815>
- [40] M. T. Phan, I. Thouvenin, and V. Frémont, “Enhancing the driver awareness of pedestrian using augmented reality cues,” in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Nov 2016, pp. 1298–1304.
- [41] P. Lungaro, K. Tollmar, and T. Beelen, “Human-to-ai interfaces for enabling future onboard experiences,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct*, ser. AutomotiveUI '17. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 94–98. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/3131726.3131737>
- [42] C. Wiltz, <https://www.designnews.com/consumer-electronics/how-augmented-reality-can-help-us-accept-autonomous-cars/28666601947034>.
- [43] S. Ropelato, F. Zünd, S. Magnenat, M. Menozzi, and R. W. Sumner, “Adaptive tutoring on a virtual reality driving simulator,” in *Proceedings of the 1st Workshop on Artificial Intelligence Meets Virtual and Augmented Worlds (AIVRAR) in conjunction with SIGGRAPH Asia 2017*, 2017.
- [44] simcraft, <https://www.simcraft.com/education/10>.
- [45] X-Sim, <https://www.x-sim.de/software.php?lang=eng&page=gamelist>.
- [46] M. Systems, <https://motionsystems.eu/vr-headway/>.
- [47] matzman666, <https://github.com/matzman666/OpenVR-InputEmulator/releases>.
- [48] B. Dalgarno and M. J. W. Lee, “What are the learning affordances of 3-d virtual environments?” *British Journal of Educational Technology*, vol. 41, no. 1, pp. 10–32. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8535.2009.01038.x>
- [49] F. Weichert, D. Bachmann, B. Rudak, and D. Fisseler, “Analysis of the accuracy and robustness of the leap motion controller,” *Sensors*, vol. 13, no. 5, pp. 6380–6393, 2013.
- [50] B. M. Muir and N. Moray, “Trust in automation. part ii. experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation.” *Ergonomics*, vol. 39 3, pp. 429–60, 1996.
- [51] J. K. Lee and N. Moray, “Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems.” *Ergonomics*, vol. 35 10, pp. 1243–70, 1992.
- [52] A. Laurino, “Strumenti di simulazione in realtà virtuale per la valutazione dell’esperienza utente in veicoli a guida autonoma.”
- [53] M. Wheeler, https://www.photonics.com/Articles/HUD_Systems_Augmented_Reality_Is_Coming_to_Your/a58298.
- [54] P. A. Hancock, R. J. Jagacinski, R. Parasuraman, C. D. Wickens, G. F. Wilson, and D. B. Kaber, “Human-automation interaction research: Past, present, and future,” *Ergonomics in Design*, vol. 21, no. 2, pp. 9–14, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/1064804613477099>
- [55] L. Abdi and A. Meddeb, “Driver information system: A combination of augmented reality and deep learning,” in *Proceedings of the Symposium on*

- Applied Computing*, ser. SAC '17. New York, NY, USA: ACM, 2017, pp. 228–230. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/3019612.3019873>
- [56] S. W. A. Dekker and D. D. Woods, “Maba-maba or abracadabra? progress on human–automation co-ordination,” *Cognition, Technology & Work*, vol. 4, pp. 240–244, 2002.
- [57] P. George, I. Thouvenin, V. Frémont, and V. Cherfaoui, “Daaria: Driver assistance by augmented reality for intelligent automobile,” in *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, June 2012, pp. 1043–1048.
- [58] ISO, “Societal security – emergency management – guidelines for colour-coded alerts,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISO 22324:2015, 2015.
- [59] —, “Intelligent transport systems – forward vehicle collision warning systems – performance requirements and test procedures,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, ISO 22324:2015, 2013.
- [60] G. Johansson and K. Rumar, “Drivers’ brake reaction times,” *Human Factors*, vol. 13, no. 1, pp. 23–27, 1971, pMID: 5542208. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1177/001872087101300104>
- [61] A. Sebastian, M. Tang, Y. Feng, and M. Looi, “Multi-vehicles interaction graph model for cooperative collision warning system,” in *2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, June 2009, pp. 929–934.
- [62] Unity Technologies, <https://unity3d.com/learn/tutorials/projects/stealth-tutorial-4x-only/enemy-sight>.
- [63] BMW Group, <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0197906EN/pedestrian-warning-with-city-braking-activation-from-bmw-connecteddrive-receives-euro-ncap-advanced-award-2014?language=en>.
- [64] Volvo Cars, <https://www.media.volvocars.com/uk/en-gb/media/videos/18528>.
- [65] Cadillac, <https://my.cadillac.com/learnAbout/automatic-braking/2018/Escalade>.
- [66] Audi, https://www.audi-technology-portal.de/en/electrics-electronics/driver-assistant-systems/audi-q2-pre-sense-front_en.
- [67] W. Narzt, G. Pomberger, A. Ferscha, D. Kolb, R. Müller, J. Wiegardt, H. Hörtnner, and C. Lindinger, “A new visualization concept for navigation systems,” in *User-Centered Interaction Paradigms for Universal Access in the Information Society*, C. Stary and C. Stephanidis, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004, pp. 440–451.
- [68] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, “Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness,” *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993. [Online]. Available: https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3
- [69] R. S. Kalawsky, “Vruse—a computerised diagnostic tool: for usability evaluation of virtual/synthetic environment systems,” *Applied Ergonomics*, vol. 30, no. 1, pp. 11 – 25, 1999. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687098000477>
- [70] K. E. Schaefer, *Measuring Trust in Human Robot Interactions: Development of the “Trust Perception Scale-HRI”*. Boston, MA: Springer US, 2016, pp. 191–218. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7668-0_10

- [71] NASA, <https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/TLX/>.
- [72] R. M. Taylor, "Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design," in *Proceedings of the AGARD AMP Symposium on Situational Awareness in Aerospace Operations, CP478*. Seuilly-sur Seine: NATO AGARD, 1989.