



Politecnico di Torino
Ingegneria informatica

Tesi di laurea magistrale

**Applicazione di realtà aumentata
a supporto di operazioni di
manutenzione e riparazione in
ambito industriale**

Relatori

Prof. Andrea Sanna
Prof. Fabrizio Lamberti

Candidato
Fabio Ariotti

Dicembre, 2017

Indice

Elenco delle figure	III
Introduzione	VI
1 Stato dell'arte	1
1.1 La manutenzione in ambito industriale	1
2 La realtà aumentata	7
2.1 La realtà aumentata	7
2.2 Continuum reale-virtuale	8
2.3 Modalità di realtà aumentata	9
2.3.1 Modalità see-through	12
2.3.2 Modalità hand-held	14
2.3.3 Modalità proiettiva	14
2.4 Confronto tra dispositivi e tecnologie	15
2.5 Microsoft HoloLens e la mixed reality	20
2.5.1 Specifiche tecniche	20
2.5.2 Parametri di qualità principali	21
2.5.3 Field of view	22
2.5.4 Interpretazione dello spazio	24
2.5.5 Modalità di input	25
2.5.6 Spatial mapping	27
2.5.7 Spatial sound	30
3 Requisiti del progetto	31
3.1 Requisiti progetto	31
3.2 La connessione Internet del sito	32
3.3 Operazioni specifiche degli operatori	32
3.4 Compiti principali e struttura generale dell'applicazione	34
3.5 Struttura gerarchica delle cartelle	35
3.6 Oggetti funzionali	36
3.6.1 Document browser	36
3.6.2 Procedure guidate	36
3.6.3 Pannelli informativi	37
3.6.4 Immagini di riferimento	37
4 Sviluppo e progettazione interfaccia	38
4.1 Sviluppo e progettazione dell' interfaccia	38
4.2 Mixed Reality Toolkit Unity	38

4.3	I marker e Vuforia	39
4.3.1	Configurazione delle camere	41
4.3.2	Configurazione del marker	41
4.4	Considerazioni generali sullo sviluppo di interfacce utente	42
4.5	Sviluppo dei componenti	43
4.5.1	La <i>room</i>	43
4.5.2	Document browser	45
4.5.3	Comunicazione Client - Server	49
4.5.4	Checklist	53
4.5.5	Pannello informativo	54
4.5.6	Menù	55
5	Risultati	57
5.1	Test in fase di progettazione	57
5.1.1	Criticità del dispositivo	57
5.1.2	Problemi legati ai componenti usati	57
5.2	Test soggettivi	60
6	Conclusioni	64
	Ringraziamenti	66

Elenco delle figure

1	Principali protagonisti mondiali in campo AR/VR	vi
1.1	Caratteristiche degli studi descritti	4
1.2	Risultati raggiunti	5
2.1	Continuum realtà-virtualità	9
2.2	Dopo il riconoscimento del marker vengono mostrati i contenuti associati	11
2.3	Schema concettuale dei componenti di un visore see-through	12
2.4	Contenuto virtuale mostrato in un contesto reale grazie al visore HoloLens	13
2.5	Schema concettuale dei dispositivi hand-held	14
2.6	Proiezione dei componenti interni di un'automobile	15
2.7	Rappresentazione delle funzionalità principali di Project Tango	16
2.8	Arredamento interni con l'app Wayfair	17
2.9	App Measure per misurare oggetti	17
2.10	Meta 2	18
2.11	Microsoft HoloLens	21
2.12	Aree del campo visivo umano	22
2.13	Distanze ottimali per il posizionamento dei contenuti virtuali	23
2.14	Raycasting del dispositivo	25
2.15	Gesture frame	26
2.16	Gesto di selezione	26
2.17	Gesto bloom	27
2.18	Scansione dell'ambiente vista dal dispositivo	28
3.1	Possibile architettura di rete	32
3.2	Operatore riceve dati del modulo davanti al quale si trova	33
3.3	Diagramma relazionale dei componenti principali	35
4.1	Organizzazione dei livelli per lo sviluppo di un'applicazione per HoloLens	39
4.2	Esempio di marker con poche caratteristiche rilevanti	40
4.3	Marker classificato come ottimo per le molte caratteristiche rilevate	40
4.4	Parametri di configurazione delle camere	41
4.5	Parametri di configurazione dell'Image target	42
4.6	Icone appartenenti alla <i>room</i> posizionata	44
4.7	Gerarchia dei componenti del document browser	46
4.8	Interfaccia document browser	47
4.9	Più pagine mostrate contemporaneamente	48

4.10	Le diverse fasi del filtro delle pagine	50
4.11	Scambio di messaggi client-server all'avvio dell'applicazione	51
4.12	Comunicazione client-server relativa alla documentazione	52
4.13	Struttura dei pacchetti di rete scambiati	52
4.14	Interfaccia checklist	53
4.15	Tasto <i>done</i> abilitato	54
5.1	Errore nel posizionamento di un modulo in fase di test	58
5.2	Frame rate con componente <i>raw image</i>	59
5.3	Frame rate con componente <i>image</i>	59
5.4	Grafico valutazioni hardware	60
5.5	Caratteristiche del dispositivo	61
5.6	Caratteristiche generali dell'applicazione	62
5.7	Valutazioni dell'interazione e dell'interfaccia	62
5.8	Utilità AR	63

Introduzione

La realtà aumentata (AR) è una tecnologia destinata a rivoluzionare completamente scenari e processi appartenenti alla vita di tutti i giorni.

Questa nuova tecnologia permette di interpretare il mondo reale attraverso dispositivi di acquisizione, sia fissi che indossabili, arricchendolo con informazioni e dettagli altrimenti non visibili agli utenti.

La realtà aumentata è una tecnologia in continuo sviluppo, che ha subito un ulteriore aumento di interesse negli ultimi anni anche grazie all'avvento della quarta rivoluzione industriale, conosciuta come *Industry 4.0*, relativa all'introduzione di nuove tecnologie in campo industriale.

Negli ultimi anni numerose aziende e diversi colossi informatici hanno investito tempo e risorse nello studio e nello sviluppo di nuovi dispositivi di AR.

La figura 1 rappresenta uno schema contenente tutte le più grandi aziende impegnate nell'ambito della realtà aumentata e di quella virtuale sia per quanto riguarda lo sviluppo hardware che software.

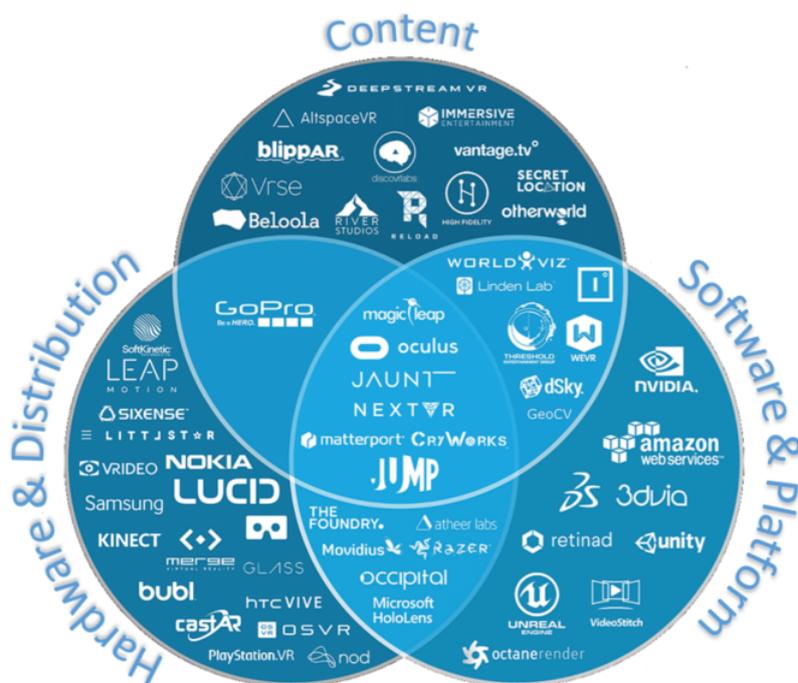


Figura 1: Principali protagonisti mondiali in campo AR/VR.

Già a partire dagli anni '90, la realtà aumentata è stata oggetto di numerosi studi relativi a differenti ambiti; oggi i campi applicativi e di utilizzo di queste tecnologie sono pressoché infiniti.

In campo medico sono state realizzate applicazioni per la formazione di nuovo personale, per il supporto durante le operazioni chirurgiche e per la visualizzazione di parametri relativi al paziente.

Esistono applicazioni in ambito militare, per l'addestramento, che simulano un campo di battaglia riducendo così i costi legati all'utilizzo di munizioni o mezzi militari. L'ambito industriale ha visto la nascita di applicazioni per la visualizzazione di parametri operativi in tempo reale, la supervisione dei processi di produzione, il supporto nella manutenzione e la formazione di nuovo personale.

La realtà aumentata, che fino a pochi anni fa veniva vista come una tecnologia ancora in fase di sperimentazione, è una delle tecnologie emergenti coinvolte nel trend dell'industria 4.0 quando si parla di fabbrica intelligente.

A differenza della realtà virtuale che rappresenta sicuramente un'esperienza più immersiva simulando la realtà e immergendo l'utente in un mondo completamente virtuale, la realtà aumentata è incentrata sull'arricchimento del mondo reale mediante la contestualizzazione di informazioni digitali altrimenti non percepibili dall'uomo. Le informazioni aggiunte hanno lo scopo di rendere l'esperienza degli utenti più ricca, chiara e utile, ma anche divertente a seconda dell'ambito.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati e introdotti in commercio numerosi dispositivi, sia indossabili che portatili, legati alla realtà aumentata.

L'industria è sicuramente uno degli ambiti in cui viene utilizzata maggiormente.

L'integrazione di simili tecnologie in contesti industriali è dovuta principalmente alla necessità di velocizzare le operazioni di manutenzione e migliorare i processi produttivi in termini di efficienza ed efficacia.

Queste tecnologie devono essere adattabili, cioè in grado di fornire un sistema di gestione e assistenza configurabile, scalabile e interoperabile che consenta di integrarle con componenti hardware e software già esistenti.

È proprio in ambito industriale che l'introduzione di nuove tecnologie ha suscitato un interesse crescente per quanto riguarda il supporto agli operatori sul campo.

Quest'ultimo è il tema alla base del progetto realizzato per la tesi.

Il lavoro svolto si incentra sulla progettazione e sulla realizzazione di un'applicazione di *mixed reality*, per arricchire il mondo reale con contenuti sintetici con i quali l'utente può interagire, a supporto delle operazioni di manutenzione e riparazione svolte dagli operatori in ambito industriale.

Gli obiettivi principali di un'applicazione di questo tipo sono: la fruizione comoda ed efficiente di documentazione digitale, il supporto agli operatori nelle operazioni da svolgere e una più efficiente ricerca dei motivi di guasto in un impianto industriale. Spesso infatti gli operatori che si occupano di manutenzione o riparazione, devono consultare una grande quantità di manuali, schemi elettrici e meccanici.

Inoltre le numerose operazioni da svolgere per effettuare una particolare procedura possono portare all'errore con conseguente perdita di tempo e di efficienza del processo di produzione.

Infine, la ricerca dei guasti, dovuti specialmente a componenti elettronici dei vari macchinari, è molto onerosa sia in termini di tempo che di risorse impiegate.

Evitare questi inconvenienti e soddisfare la necessità di visualizzare in tempo reale informazioni legate ai diversi moduli di una linea di produzione come il nome dei

vari componenti, i valori dei parametri operativi e una descrizione della funzione principale dei macchinari sono le ragioni fondamentali per le quali la realtà aumentata si sta sviluppando sempre di più nelle industrie.

Un altro importante beneficio che la realtà aumentata può portare in ambito industriale e non solo, è legato alla formazione di nuovo personale e alla specializzazione di quello già formato.

Se infatti industrie ed ambienti di produzione possono avere politiche diverse legate alla gestione del processo industriale, la formazione del personale è di fondamentale importanza.

Una formazione di alta qualità porta infatti ad un ambiente lavorativo più sicuro, produttivo ed efficiente.

Questo risulta però generalmente molto oneroso in termini di tempo, risorse e figure professionali adatte ad affiancare gli utenti in fase di *training*.

La realtà aumentata, come strumento flessibile, scalabile e personalizzabile, può limitare l'impiego di risorse fornendo una guida mediante supporto sia audio che visivo.

Può inoltre limitare il tempo impiegato per formare nuovo personale in quanto può fornire un supporto costante durante l'apprendimento delle varie procedure previste. Sicuramente anche l'impiego di personale specializzato può essere ridotto in quanto tramite i dispositivi AR il personale da formare può ricevere assistenza anche da remoto.

Gli operatori sul campo possono infatti collegarsi con tecnici a distanza che, osservando lo stream video trasmesso dal dispositivo di realtà aumentata, sono in grado di fornire l'assistenza richiesta come se fossero presenti sul campo.

Il progetto di tesi realizzato è bastato sullo sviluppo di componenti di supporto virtuali per l'assistenza legata alle operazioni di manutenzione e riparazione.

Questi componenti possono essere utilizzati mediante un sistema di interazione multi-modale, semplice da usare ed intuitivo.

Le tematiche principali affrontate sono inerenti a diversi temi: l'analisi dei vari dispositivi di realtà aumentata e delle tecniche che utilizzano per introdurre oggetti virtuali in un contesto reale, lo studio degli strumenti utili allo sviluppo di un'applicazione AR, la risoluzione delle criticità legate al tipo di ambiente per cui è pensata l'applicazione e lo sviluppo dell'interfaccia utente necessaria.

Obiettivo del progetto è anche quello di sviluppare un software flessibile che sia potenzialmente riutilizzabile e applicabile a diversi casi d'uso e scenari.

La tesi così realizzata è composta da otto capitoli.

Il primo capitolo è focalizzato sull'analisi degli studi condotti e incentrati sullo sviluppo di tecnologie in ambito industriale e sul confronto dei risultati ottenuti dai vari test legati agli esperimenti effettuati con dispositivi commerciali o prototipali.

Nel secondo viene introdotta la realtà aumentata descrivendo i principali dispositivi presenti sul mercato, differenziandoli per tipo e tecniche utilizzate.

In particolare verranno approfondite le caratteristiche relative a dispositivi di tipo proiettivo, *see-through* e *hand-held*. L'analisi effettuata evidenzia le motivazioni che hanno portato alla scelta del dispositivo utilizzato per il progetto.

La seconda parte del capitolo analizza quindi le caratteristiche hardware e software di tale dispositivo.

Il terzo capitolo è incentrato sullo studio dei requisiti forniti dal committente e sulla descrizione della struttura dell'applicazione realizzata.

Nel quarto vengono analizzate le caratteristiche degli strumenti di sviluppo utilizzati e spiegati dettagliatamente i passi effettuati per la creazione dei vari componenti di supporto.

Il quinto capitolo riporta i risultati ottenuti a seguito dei test effettuati sulle prestazioni e sulle funzionalità dell'applicazione.

Gli ultimi capitoli analizzano le conclusioni e le idee per possibili sviluppi futuri, i ringraziamenti e la bibliografia.

Capitolo 1

Stato dell'arte

1.1 La manutenzione in ambito industriale

La manutenzione in ambito industriale è diventata un'attività sempre più importante per il ciclo di vita della produzione; questo ha portato alla necessità di pianificarla ed eseguirla attraverso l'utilizzo di nuove tecnologie.

La realtà aumentata, che fino a pochi anni fa veniva vista come una tecnologia ancora in fase di sperimentazione, è una delle tecnologie emergenti maggiormente coinvolte in questo ambito grazie all'avvento della quarta rivoluzione industriale, conosciuta come Industry 4.0.

Con questo termine si indica infatti l'introduzione di nuove tecnologie in campo industriale per migliorare i processi produttivi e velocizzare quelli di manutenzione.

I sistemi di produzione odierni, grazie alla continua innovazione portata dall'introduzione di tecnologie, stanno raggiungendo un livello di automazione sempre più elevato con conseguente aumento della complessità; ciò richiede competenze tecniche sempre maggiori.

Nel campo della supervisione del processo industriale, soprattutto manutenzione, ispezione o attività di servizio, quasi sempre è necessario visualizzare dati in tempo reale sullo stato del processo tecnico per rilevare eventuali fonti di errore e garantire la sicurezza del personale. Nel caso di apparecchiature complesse è necessario per gli operatori accedere a documentazione sia cartacea che digitale.

In ambito industriale, i processi di manutenzione sono molto importanti per garantire qualità sul prodotto.

Negli ambienti con interazione uomo-computer, l'utente ottiene molteplici informazioni da diverse fonti; questo sovraccarico può portare ad un'interpretazione errata di tali informazioni con conseguenti errori di valutazione che possono compromettere le attività industriali.

L'idea di utilizzare la realtà aumentata per supportare gli operatori in ambito industriale non è recente; uno dei primi progetti di AR relativi all'industria è stato lanciato da Boeing negli anni '90 dai due ricercatori Thomas Caudell e David Mizell e riguarda le sfide intraprese nella produzione di aeromobili[1].

La loro idea era fornire un visualizzatore "see-through" al lavoratore di fabbrica e utilizzare questo dispositivo per integrare nel campo visivo del lavoratore informazioni dinamiche.

Contemporaneamente vennero proposti diversi prototipi per dimostrare l'applicazione della realtà aumentata legata alla produzione industriale[2]. Nel 1993, è stata

proposta da Steven K. Feiner insieme ai suoi collaboratori un prototipo per il supporto durante la manutenzione di una stampante laser introducendo così il concetto di realtà aumentata di conoscenza per l'assistenza alla manutenzione KARMA[3][4]. Nel 1995 Whitaker Ross insieme ad altri ricercatori proposero un sistema per visualizzare il nome della parte di un motore indicata dall'utente[5].

Negli anni 2000, il crescente interesse per la realtà aumentata ha portato alla fondazione di importanti gruppi: uno di questi è il più grande consorzio per la realtà aumentata applicata in campo industriale, sostenuto dal Ministero Federale tedesco della Pubblica Istruzione e della Ricerca ARVIKA e creato con l'obiettivo di ricercare e attuare soluzioni di realtà aumentata nelle industrie tedesche più rilevanti[6]. La Comunità Europea ha creato diversi progetti tra cui STAR, una collaborazione tra istituti e aziende provenienti dall'Europa e dagli Stati Uniti[7] e ARTESAS derivato dal progetto ARVIKA e incentrato sullo sviluppo di applicazioni di realtà aumentata per la manutenzione automobilistica e aerospaziale[8].

Più recentemente sono stati condotti diversi studi empirici con lo scopo di collaudare l'efficacia dell'AR applicata ad operazioni industriali.

Nel 2010, per esempio, uno studio condotto presso l'università di Bologna[9] relativo al supporto per il training e la manutenzione di aerei tramite sistemi di realtà aumentata, ha evidenziato come l'impiego di display di realtà aumentata riduca i tempi di manutenzione.

I ricercatori si sono concentrati sulla manutenzione effettuata prima della primo volo del giorno. Con il supporto di esperti hanno studiato le operazioni da compiere identificando fasi principali e sottofasi. Secondo tale analisi, l'ispezione giornaliera è composta da un controllo esterno e da uno controllo interno.

Ogni controllo è organizzato in una serie di compiti che corrispondono a diverse ispezioni ai vari sistemi di controllo del velivolo.

L'interfaccia utente creata mostra all'utente passo a passo le operazioni che deve svolgere fornendo anche un feedback sulla percentuale di completamento.

I risultati raccolti hanno mostrato che complessivamente gli operatori, grazie alla visualizzazione di procedure guidate, non hanno eseguito operazioni superflue con conseguente perdita di tempo.

Due studi[10][11] effettuati rispettivamente nel 2008 e nel 2009 si sono incentrati sul confronto delle prestazioni di due gruppi di lavoratori durante lo svolgimento delle stesse attività di assemblaggio o manutenzione.

Uno dei due gruppi ha svolto le operazioni in modo tradizionale con l'uso di manuali mentre il secondo gruppo è stato equipaggiato con dispositivi di realtà aumentata. Quello che è emerso dalle analisi dei ricercatori è un incremento delle prestazioni che arriva fino al 50% nell'esecuzione di certe attività, il che significa che l'AR permette ai tecnici di eseguire un determinato compito in maniera più rapida e con minori possibilità di errore.

Ne conseguono benefici economici dal momento che la riduzione dei tempi di esecuzione si riflette in molti casi in un costo del lavoro più basso.

Presso il Kobe Institute of computing in Giappone, Oduor Andrew Orlando e Sador Markon, hanno condotto uno studio[12] in un sito industriale di Mombasa in Kenya focalizzato sulla riduzione del 20% dei tempi di manutenzione grazie all'uso di un head mounted display per visualizzare la documentazione necessaria alla manutenzione di diversi componenti.

Il processo di manutenzione riportato nell'articolo è composto da una prima fase

nella quale avviene il riconoscimento di un macchinario grazie a un marker di tipo barcode o QRcode. Una volta riconosciuto il macchinario, viene mostrata la documentazione relativa con le istruzioni necessarie per una completa manutenzione.

Nadia Zenati, Nouredine Zerhouni e Karim Achor hanno condotto uno studio simile[13] tramite un prototipo di un sistema di manutenzione basato su un dispositivo di realtà aumentata che, grazie alla computer vision è in grado di riconoscere determinati oggetti e mostrare immagini, video, istruzioni per la manutenzione ed eventuali modelli 3D relativi all'oggetto riconosciuto dal head mounted display.

Un articolo pubblicato da Doris Aschenbrenner, Marc Erich Latoschik e Klaus Schilling[14] dell'università tedesca di Würzburg riguarda due casi di assistenza nelle operazioni di manutenzione e riparazione.

Il primo caso di studio prevede l'utilizzo di un tablet e di un head mounted display per guidare, tramite testo e audio, un operatore durante la sostituzione di un controllore. Da questo primo caso è stato valutato meglio l'utilizzo del tablet piuttosto che del visore see-through anche se, come riportato nell'articolo, non sono state trovate differenze significative in termini di efficienza tra i due sistemi.

Il secondo caso di studio riguarda l'assistenza da parte di un operatore da remoto mediante un sistema AR piuttosto che tramite l'utilizzo di video dimostrativi.

Dal momento che il tecnico remoto deve essere in grado di identificare correttamente il processo avendo una visione chiara e completa di esso e dell'ambiente, il dispositivo deve fornire una corretta visione e prospettiva del macchinario su cui effettuare la manutenzione.

Sono poi stati effettuati dei sondaggi da cui è emerso che l'assistenza basata sul dispositivo di realtà aumentata presenta una superiorità significativa di prestazioni in generale anche se alcune delle operazioni svolte hanno evidenziato prestazioni leggermente migliori riguardo all'utilizzo di video.

Un altro confronto tra diversi sistemi di AR utilizzati per supportare la manutenzione in campo industriale è stato effettuato da uno studio finlandese[15] in cui viene messo a confronto un sistema AR basato su tablet con un sistema basato sull'uso di un dispositivo indossabile di realtà aumentata utilizzato insieme ad uno smartphone e ad uno smartwatch.

Gli operatori hanno evidenziato come più dispositivi contemporaneamente non siano semplici da utilizzare al meglio ricordando tutte le loro funzionalità; singolarmente invece, specialmente il dispositivo indossabile, ha semplificato e velocizzato le operazioni di manutenzione.

Sono stati riscontrati pareri nettamente positivi per quanto riguarda l'utilizzo del sistema AR basato su tablet; questo è stato ritenuto utile soprattutto nei casi in cui le operazioni svolte vengano effettuate per la prima volta o il processo di manutenzione sia particolarmente lungo e articolato.

Nonostante il sistema sia stato giudicato facile da utilizzare, è stata riscontrata un lato nativo legato al suo primo utilizzo. Gli operatori si sono infatti dovuti abituare all'uso di un sistema mai utilizzato prima.

I ricercatori del centro di sviluppo di tecnologie avanzate di Baba-Hassen in Algeria hanno condotto un esperimento[16] per descrivere due casi di manutenzione tramite assistenza remota. Entrambi gli scenari prevedono un operatore sul campo dotato di un dispositivo indossabile di realtà aumentata e un tecnico da remoto che, ricevendo lo stream video catturato dalla camera del dispositivo AR, fornisce assistenza all'operatore sul campo.

La caratteristica interessante del sistema è la visualizzazione di mani virtuali inserite nello stream video che seguono i movimenti reali effettuati dall'operatore sul campo grazie al riconoscimento, da parte del dispositivo AR, di una serie di gesti predefiniti. I due casi di studio sono piuttosto semplici, il primo prevede la sostituzione della cartuccia di una stampante mentre il secondo riguarda il cambio dell'olio del motore di una vettura.

In entrambi i casi i risultati evidenziano una particolare usabilità e flessibilità del sistema AR confrontato con uno scenario che prevede l'utilizzo di un tablet AR.

Una delle caratteristiche del sistema AR ritenute soddisfacenti e ottime dagli operatori è proprio il fatto di poter avere le mani libere durante tutta la durata delle operazioni di manutenzione a differenza dello scenario in cui viene utilizzato il tablet.

In figura 1.1 è riportata una tabella riassuntiva degli ambiti, delle caratteristiche principali e dei dispositivi utilizzati negli studi presentati in precedenza.

ARTICOLO	AMBITO	DISPOSITIVI USATI	SCOPO	PROTOTIPO
Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes[1]	aerospaziale	see-through	manutenzione	NO
			assemblaggio	
Annotating the real world with knowledge-based graphics on a see-through head-mounted display[3]	industriale	see-through	manutenzione	NO
Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support[9]	industriale	see-through	manutenzione	Sì
Augmented Reality Efficiency in Manufacturing Industry: A Case Study[10]	automobilistico	HMD helmet	assemblaggio	NO
Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier	militare	HMD	manutenzione	Sì
			riparazione	
The use of augmented reality in the maintenance of mechanical objects[12]	industriale	HMD	manutenzione	Sì
Use of Wearable and Augmented Reality Technologies in Industrial Maintenance Work[15]	industriale	tablet, HMD	manutenzione	Sì
Augmented reality system based on hand gestures for remote maintenance[16]	industriale	tablet, HMD	manutenzione	NO

Figura 1.1: Caratteristiche degli studi descritti

La tabella in figura 1.2 si collega alla precedente e riporta per ogni articolo il tipo di confronto effettuato ed i risultati ottenuti.

ARTICOLO	TIPO DI CONFRONTO	RISULTATI
Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes[1]	Confronto prestazioni tra dispositivo AR e metodi tradizionali	<ul style="list-style-type: none"> • non si devono configurare più le tavole schematiche • meno ingombro durante le operazioni con AR
Annotating the real world with knowledge-based graphics on a see-through head-mounted display[3]	Confronto prestazioni tra dispositivo AR e metodi tradizionali	<ul style="list-style-type: none"> • comodità di avere le mani libere con AR • campo visivo ridotto AR
Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support[9]	Confronto prestazioni tra dispositivo AR e manuali cartacei	<ul style="list-style-type: none"> • riduzione tempo impiegato con AR • maggior efficienza con AR • riduzione degli errori commessi con AR
Augmented Reality Efficiency in Manufacturing Industry: A Case Study[10]	Confronto prestazioni tra dispositivo AR e manuali cartacei	<ul style="list-style-type: none"> • riduzione del tempo impiegato • riduzione degli errori commessi
Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret[11]	Confronto prestazioni tra HMD, LCD e HUD	<ul style="list-style-type: none"> • riduzione del tempo impiegato con LCD • meno tempo impiegato per individuare i task con AR • dispositivo AR più comodo ergonomicamente
The use of augmented reality in the maintenance of mechanical objects[12]	Confronto prestazioni tra dispositivo AR e manuali cartacei	<ul style="list-style-type: none"> • riduzione tempo impiegato con AR • maggior accuratezza con AR • maggior qualità degli con AR
Use of Wearable and Augmented Reality Technologies in Industrial Maintenance Work[15]	Confronto prestazioni tra HMD + smartphone + smartwatch e tablet AR	<ul style="list-style-type: none"> • maggior velocità con HMD • scomodo usare tre dispositivi contemporaneamente
Augmented reality system based on hand gestures for remote maintenance[16]	Confronto prestazioni tra dispositivo AR e manuali cartacei	<ul style="list-style-type: none"> • HMD più usabile perché permette di avere mani libere • tablet scomodo da usare • operatore deve togliersi i guanti per usare il tablet

Figura 1.2: Risultati raggiunti

Come si può notare dai dati riportati nelle due tabelle, la maggior parte degli studi condotti, ha coinvolto procedure di manutenzione utilizzando dispositivi see-through e HMD perchè permettono agli operatori di avere le mani libere.

I risultati ottenuti a seguito degli studi evidenziano infatti come la realtà aumentata impiegata nelle operazioni di assemblaggio, manutenzione e riparazione riduca il tempo impiegato per portare a termine tali operazioni con un tasso di errore minore rispetto alle procedure tradizionali.

Gli studi che hanno confrontato dispositivi di realtà aumentata di tipo hand-held e

see-through, mostrano come questi ultimi ottengano quasi sempre risultati migliori rispetto ai primi, considerati in realtà spesso come un vincolo durante le operazioni svolte.

Oltre alla manutenzione, considerata una delle operazioni più delicate ed importanti in ambito industriale, la realtà aumentata può produrre benefici anche nel percorso di formazione degli operatori.

Può essere infatti utile sia per formare nuovi operatori che per aggiornare operatori esperti su nuove procedure.

L'ambiente industriale è uno dei campi in cui la realtà aumentata è maggiormente utilizzata potendo esprimere tutto il suo potenziale tecnologico; sebbene ad oggi siano stati raggiunti ottimi risultati, in generale ci sono ancora molti aspetti da migliorare per quanto riguarda i dispositivi di realtà aumentata impiegati in questo ambito.

Molti di questi infatti presentano alcuni difetti come: un campo visivo limitato, contrasto e risoluzione migliorabili e limitata potenza di calcolo.

In alcuni casi, i dispositivi, rappresentano anche una limitazione per l'utente; infatti esistono dispositivi indossabili che richiedono una connessione via cavo ad un computer per poter sfruttare una maggior potenza di calcolo limitando però il raggio di azione e i movimenti che l'utente può compiere. Un altro limite è legato ai dispositivi hand-held come tablet o smartphone in quanto non consentono all'operatore di avere le mani libere.

Sicuramente l'introduzione di dispositivi di realtà aumentata nel lavoro quotidiano degli operatori, prevede una prima fase di allenamento con conseguente perdita di tempo seguita però da vantaggi futuri come una limitazione del numero di errori commessi e una riduzione del tempo impiegato per effettuare le varie operazioni.

Tra le sfide future delle aziende sviluppatrici di tali dispositivi trovano spazio migliorie legate ad una maggiore leggerezza e un minor peso dei dispositivi con miglioramenti, sia software che hardware, legati anche alle performance e all'interazione con l'utente.

Capitolo 2

La realtà aumentata

2.1 La realtà aumentata

Prima di essere impiegata in ambito mobile con lo sviluppo di applicazioni per smartphone, tablet o visori da indossare, la realtà aumentata è stata introdotta in ambiti come quello della ricerca, della medicina o del settore militare.

A partire dagli anni '70 si svilupparono i primi visori a sovrimpressione chiamati Head-up display (HUD) utilizzati nell'aviazione militare per mostrare al pilota informazioni come la distanza dall'obiettivo, l'inclinazione del velivolo e altri dati riguardanti l'aereo da combattimento, permettendogli di mantenere lo sguardo fisso sull'obiettivo.

Nel 1990 viene utilizzato per la prima volta il termine realtà aumentata da Tom Caudell che, insieme al collega David Mizell sviluppò un display digitale che univa la grafica virtuale con la realtà fisica. Questo visore venne impiegato dagli elettricisti degli aeromobili Boeing durante le operazioni di costruzione e manutenzione.

Il display sostituì le grandi tavole di compensato contenenti le istruzioni di cablaggio delle singole parti di un aeromobile, proiettando gli schemi su tavole riutilizzabili. Una delle prime applicazioni mediche di realtà aumentata venne invece sviluppata nel 1994 presso l'università del Nord Carolina e permetteva ai medici di osservare un feto direttamente all'interno delle pazienti incinte.

Nel 1996 venne sviluppato il primo sistema collaborativo di realtà aumentata; con questo sistema più utenti potevano visualizzare oggetti virtuali nello stesso spazio condiviso.

Ogni utente era dotato di un caschetto tracciato con il quale poteva vedere immagini stereoscopiche dal suo punto di vista individuale. In tempi più recenti una delle prime applicazioni mobile a sfruttare questo approccio è stata Layar.

Si tratta di un software che, sfruttando le informazioni di geolocalizzazione fornite dal modulo GPS del dispositivo, e accoppiandole con l'orientamento dello schermo individuato da accelerometro o giroscopio, permette all'utente di inquadrare attraverso la fotocamera l'ambiente circostante, visualizzando icone relative ai punti di interesse presenti nelle vicinanze, esattamente nella direzione in cui si trovano.

Questo può risultare utile quando si cerca un luogo e si vuole capire che strada percorrere per raggiungerlo, oppure per sapere in tempo reale la posizione di altre persone nei dintorni.

Con l'aumento della richiesta di applicazioni di realtà aumentata in diversi campi, sono stati sviluppati di recente dispositivi indossabili per permettere all'utente di

svolgere le proprie azioni mantenendo le mani libere.

Tra i primi dispositivi creati, degni di nota, quello di cui si è parlato maggiormente nel corso degli ultimi anni è senza alcun dubbio Google Glass.

Progettato dal team X Lab di Google, è essenzialmente un occhiale da indossare, che visualizza informazioni e dati all'interno del campo visivo, mediante l'impiego di un piccolo display posizionato sopra l'occhio dell'utente.

La profonda integrazione con i dispositivi Android è certamente il punto di forza principale degli occhiali, perché comunicando con smartphone e tablet sono in grado di mostrare all'utente notifiche, messaggi, indicazioni stradali, aggiornamenti provenienti dai social network e molto altro ancora, senza obbligarlo a toccare il touchscreen.

Meno rilevanti ed eleganti dal punto di vista del design rispetto a Google glass sono i Sony SmartEyeglass.

Nel 2016 in occasione dell'evento dedicato alla piattaforma Windows 10, Microsoft ha sorpreso tutti annunciando Microsoft HoloLens.

In questo caso l'approccio alla fruizione e all'interazione con i contenuti è differente, poiché si fa ricorso all'impiego di ologrammi, ovvero immagini tridimensionali visualizzate attraverso uno speciale display nell'ambiente circostante, tenendo conto della giusta prospettiva e del corretto punto di osservazione.

Il visore, basato sulla tecnologia Windows Holographic, è stato progettato in collaborazione con la NASA. Il dispositivo più recente invece, è stato presentato dall'azienda Meta ed è chiamato Meta 2.

I campi applicativi e di utilizzo di queste tecnologie sono pressoché infiniti, basti pensare ad applicazioni mediche per il supporto del personale medico durante le operazioni chirurgiche o la visualizzazione di parametri relativi al paziente, applicazioni militari per la formazione del personale che simulano un campo di battaglia riducendo così i costi legati all'utilizzo di munizioni o mezzi militari oppure applicazioni industriali per la visualizzazione di parametri operativi in tempo reale, la supervisione di processi industriali e il supporto nella manutenzione.

2.2 Continuum reale-virtuale

La realtà aumentata, come spiegato, consente di combinare contenuti virtuali con oggetti reali provenienti quindi da due mondi ben separati, quello virtuale e quello reale. L'area compresa tra i due estremi, dove reale e virtuale sono mescolati, è chiamata realtà mista.

Nel 1994 Paul Milgram e Fumio Kishino sono stati i primi ad utilizzare il termine di realtà mista come graduale passaggio dal mondo reale a quello virtuale. Il passaggio tra i due mondi chiamato continuum tra ambienti reali e virtuali, è rappresentato in figura 2.1.

Il continuum comprende tutte le possibili varianti e combinazioni di oggetti reali e virtuali; come si può notare è composto da quattro diversi stadi,

Oltre alla realtà fisica e alla realtà aumentata, introdotta precedentemente e approfondita nei paragrafi seguenti, troviamo il concetto di virtualità aumentata e realtà virtuale.

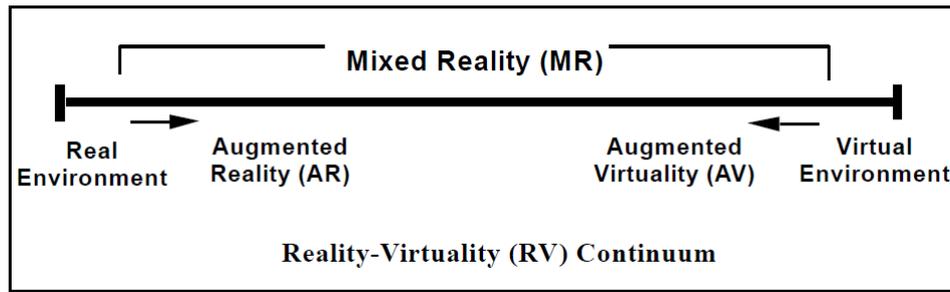


Figura 2.1: Continuum realtà-virtualità

La differenza tra realtà aumentata e virtualità aumentata consiste nel fatto che mentre la prima arricchisce il mondo reale con oggetti virtuali, la seconda aggiunge elementi del mondo reale a quello virtuale come per esempio uno stream video reale aggiunto in un ambiente completamente virtuale o la visualizzazione delle mani dell'utente mentre interagiscono con oggetti virtuali.

L'ultimo stadio è rappresentato dalla realtà virtuale, una realtà immersiva completamente diversa da ciò che ci circonda tutti i giorni. Per rendere possibile tutto ciò vengono impiegati visori che isolano completamente l'utente immergendolo in un mondo immaginario tutto virtuale. Sicuramente, tra i vari stadi, questo fornisce l'esperienza più immersiva per l'utente.

2.3 Modalità di realtà aumentata

La realtà aumentata è una tecnologia che sta cambiando completamente la vita di tutti i giorni.

La consultazione delle informazioni, la fruizione dei contenuti multimediali e l'interazione con i propri contatti sono operazioni che chiunque svolge ogni giorno.

Solitamente questo genere di azioni prevede l'utilizzo di un dispositivo equipaggiato con uno schermo che visualizza parole, immagini o filmati, da controllare mediante input assegnati tramite una tastiera, un mouse, un display touchscreen o comandi vocali.

Le tecnologie legate alla realtà aumentata evolvono questo concetto, soprattutto per quanto riguarda la visione dei dati, sovrapponendoli a ciò che circonda l'utente anziché costringerlo a guardare un supporto visivo.

Creare un'applicazione di realtà aumentata è un processo complesso composto da diverse fasi, dallo sviluppo dei modelli 3D alla tecnologia che consente di elaborare le immagini e studiare il mondo attorno.

I contenuti 3D richiedono un motore grafico per essere resi visibili all'utente, per far ciò si utilizzano gli SDK di realtà aumentata. Essi includono infatti un motore di rendering per il modello 3D, andando anche a studiare lo spazio circostante in modo da rilevare la profondità e poter posizionare e orientare correttamente gli oggetti nel mondo reale.

I concetti principali per un'applicazione di realtà aumentata sono quindi il tracking dell'ambiente e lo studio della profondità.

Quando devono essere uniti contenuti virtuali nel mondo reale, per prima cosa si

mappa l'ambiente reale per conoscerne la struttura.

La principale difficoltà di questo importante passo è quella di realizzarlo in tempo reale infatti, per poter funzionare al meglio, le applicazioni di realtà aumentata richiedono che venga continuamente aggiornato il modello rilevato dello spazio circostante a seconda dei movimenti dell'utente.

Un dettaglio importante nella mappatura dell'ambiente è lo studio della profondità; i sensori di profondità possono infatti rilevare quanto lontano o vicino sono gli oggetti in relazione al dispositivo.

La comprensione della profondità aiuta l'interazione degli elementi virtuali nel mondo reale. Gli oggetti virtuali infatti, si fondono con il mondo reale perché sono posizionati in relazione alle informazioni che vengono estratte dalla posizione degli oggetti reali.

Comunemente, gli oggetti 3D sono confinati in un mondo 2D rappresentato dallo schermo di un computer o di uno smartphone, grazie alla realtà aumentata invece questi oggetti verranno rappresentati effettivamente in 3D grazie all'uso di dispositivi progettati apposta.

Esistono principalmente due paradigmi di realtà aumentata: uno basato sull'uso di marker e l'altro senza.

Il primo caso è il metodo più popolare in tutto il mondo e sfrutta il riconoscimento di immagini.

La sfida principale delle applicazioni di realtà aumentata è dedurre la posa della camera del dispositivo. In un ambiente sconosciuto è molto impegnativo in quanto sono richiesti molti dati legati all'ambiente circostante.

Una possibile soluzione per semplificare questo compito, è basata sul riconoscimento di marker nel mondo reale da parte della camera del dispositivo.

La popolarità dei sistemi basati sul riconoscimento di marker è in parte spiegata dal fatto che sono facili da implementare grazie anche a toolkit sviluppati per porre una buona base per avviare lo sviluppo di applicazioni AR.

I marker possono essere di diverso tipo, QR code, immagini e fotografie stampate oppure oggetti nel mondo reale.

Le fotocamere dei dispositivi utilizzati riescono a distinguere questi marker da tutti gli altri tipi di oggetti

Quando i marker vengono riconosciuti mostrano i contenuti digitali ad essi associati come mostrato in figura 2.2.

L'applicazione è inoltre in grado di calcolare la posizione e l'orientamento di tali marker in modo che un qualsiasi cambiamento vada ad influenzare posizione e orientamento del contenuto virtuale associato.

Esistono diverse applicazioni che sfruttano questo paradigma, da applicazioni museali ad applicazioni industriali.

Il secondo paradigma invece, conosciuto anche come realtà aumentata di posizione, utilizza dati provenienti dai sensori del dispositivo come GPS, bussola, giroscopio e accelerometro per fornire informazioni sulla posizione corrente.

Questi dati permettono di determinare quali contenuti virtuali mostrare all'utente in base ai suoi movimenti. Il metodo usato per posizionare gli elementi virtuali si basa su caratteristiche naturali anziché sulle caratteristiche dei marker specifici e può utilizzare un approccio basato sul modello o sull'elaborazione delle immagini per rilevare le funzionalità che forniscono i dati necessari a determinare la posizione e l'orientamento del dispositivo di realtà aumentata.

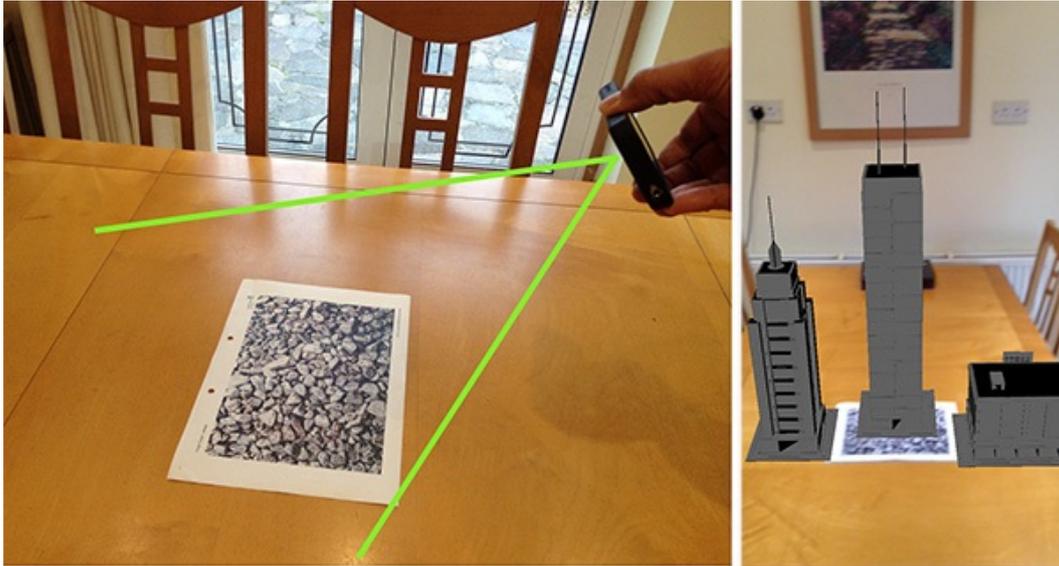


Figura 2.2: Dopo il riconoscimento del marker vengono mostrati i contenuti associati

Per quanto riguarda la realtà aumentata, è possibile utilizzare un approccio basato sul modello e uno sullo studio delle immagini.

Per tracciare la posizione della camera è necessario fornire al dispositivo i modelli degli oggetti reali codificati come progetti CAD.

Questi modelli vengono poi continuamente confrontati e ricercati nelle immagini provenienti dalla camera.

Il tracking senza marker è una tecnologia che dovrebbe migliorare le applicazioni di realtà virtuale e aumentata però le limitazioni tecnologiche attuali richiedono ancora un compromesso tra la precisione e l'efficienza.

Da un lato infatti, più informazioni vengono raccolte dall'applicazione, più preciso sarà il tracking. D'altra parte, meno informazioni corrispondono anche a un minor numero di calcoli con un incremento dell'efficacia.

Oltre al compromesso tra la precisione e l'efficienza, il monitoraggio delle caratteristiche naturali dipende molto anche dalla dimensione dell'ambiente attorno all'utente e dalle condizioni di illuminazione di quest'ultimo.

L'intensità dell'illuminazione della luce infatti influenza le immagini acquisite dalla fotocamera rendendo difficile il riconoscimento delle caratteristiche specifiche degli oggetti e dell'ambiente.

Altri fattori da cui dipende la precisione del monitoraggio sono le caratteristiche degli oggetti:

- **Forma e struttura:** il monitoraggio risulta più facile quando un oggetto presenta una forma e una texture uniche.
- **Contrasto:** ovviamente con un maggior contrasto tra gli oggetti e l'ambiente in cui si trovano, il monitoraggio risulta più preciso e veloce.
- **Riflessione della luce:** poiché l'illuminazione è una caratteristica importante che influenza il monitoraggio, le riflessioni della luce dovute ad esempio a materiali metallici o in vetro possono compromettere il tracking.

Uno degli approcci basati sui modelli forniti estrae le caratteristiche delle immagini del modello e le confronta con quelle estratte da un'immagine del modello. Il confronto genera coppie di caratteristiche dette corrispondenze.

Il sistema di monitoraggio utilizza le corrispondenze per stimare la posizione e l'orientamento della fotocamera.

Ovviamente più corrispondenze vengono trovate, più il tracciamento della posa della camera risulterà preciso

La quantità di modelli che devono essere forniti all'applicazione può essere uno svantaggio in quanto spesso la modellazione risulta onerosa in termini di tempo.

L'approccio basato sull'elaborazione delle immagini invece si basa sulle corrispondenze rilevate ad esempio tra fotogrammi successivi.

Ovviamente per avere la sicurezza che il tracciamento della posa della camera risulti preciso, si devono estrarre un'elevata quantità di funzioni aumentando però la complessità computazionale.

Il paradigma basato sull'assenza di marker presenta generalmente meno limiti del primo in quanto non dipende dal riconoscimento dei marker che devono essere posizionati precedentemente nell'ambiente.

La modalità di visualizzazione degli oggetti virtuali cambia a seconda del paradigma utilizzato.

2.3.1 Modalità see-through

Il processo che consente di unire i contenuti virtuali al mondo reale è schematizzato in figura 2.3.

I visori see-through, sono dispositivi composti da display parzialmente trasparenti che mescolano le immagini digitali con il mondo reale.

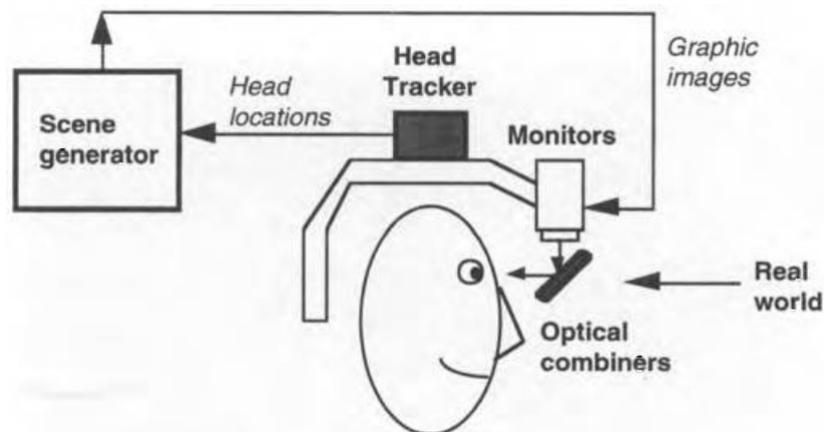


Figura 2.3: Schema concettuale dei componenti di un visore see-through

Un combinatore ottico posto di fronte agli occhi dell'utente gli permette di vedere il mondo reale riducendo in parte la luce proveniente da esso. Essendo parzialmente riflettente consente anche di mostrare all'utente immagini virtuali relative ai contenuti olografici.

Le immagini del mondo reale fornite dalla camera del dispositivo, una volta catturate vengono combinate con le scene virtuali generate dallo scene generator.

Il risultato viene inviato al monitor posto davanti agli occhi dell'utente in modo da mostrargli in tempo reale il mondo di fronte arricchito dei componenti virtuali generati.

Attualmente esistono due tipi di display trasparenti: OLED e LCD entrambi composti da una serie di schermi sovrapposti.

I display OLED sono composti da molti strati sovrapposti che operano un'attrazione tra particelle caricate positivamente e negativamente.

Quando viene applicata la corrente elettrica, uno strato diventa carico negativamente rispetto ad un altro strato trasparente e, mentre l'energia passa dal catodo all'anodo, stimola i composti organici presenti tra i due strati, solitamente dei polimeri conduttivi, che producono luce visibile attraverso lo strato di copertura in vetro.

I display LCD utilizzano l'illuminazione naturale al posto della retroilluminazione elettrica. La mancanza di una retroilluminazione consente agli schermi di essere molto sottili.

In tutti e due i casi, ogni schermo consente di accendere la luce e di mostrare i contenuti digitali come un monitor. Ogni schermata mostra un'immagine leggermente diversa per creare un'illusione stereoscopica.

Più nel dettaglio la luce naturale passa attraverso due strati che fungono da guide d'onda. Gli schermi sono dunque delle guide d'onde planari, la luce rimbalza tra gli strati.

Questi dispositivi permettono di mostrare contenuti virtuali, come si può notare in figura 2.4, senza perdere il contatto visivo con il mondo reale come avviene invece con i visori di realtà virtuale.



Figura 2.4: Contenuto virtuale mostrato in un contesto reale grazie al visore HoloLens

2.3.2 Modalità hand-held

I dispositivi portatili (hand-held) utilizzano un piccolo display che si adatta alla mano dell'utente.

Tramite questi display e le fotocamere ormai presenti su quasi tutti i dispositivi come smartphone e tablet, è possibile realizzare applicazioni di realtà aumentata.

Esempi recenti di applicazioni di questo tipo sono Pokemon-Go e Ingress, entrambi sviluppati da Niantic, società specializzata nello sviluppo di giochi di realtà aumentata.

Il funzionamento delle due applicazioni è pressoché uguale, entrambe combinano i dati GPS con le funzioni della camera e della realtà aumentata per sovrapporre al mondo reale oggetti virtuali.

Più precisamente, come raffigurato in figura 2.5, i dispositivi di questo tipo, grazie ad un sensore integrato effettuano un raycasting dell'ambiente circostante. I raggi rimbalzano sugli oggetti per poi venir di nuovo catturati dalla camera del dispositivo. Questa, a seconda dell'angolazione dei raggi e del tempo impiegato per tornare al dispositivo, riesce a ricostruire una mappa 3D accurata dell'ambiente.

I dati così acquisiti vengono utilizzati per effettuare un tracking del dispositivo all'interno dell'ambiente; questo permette di elaborare le immagini catturate dalla camera del dispositivo combinandole con i contenuti virtuali in una fase di rendering.

L'immagine prodotta viene quindi mostrata sul display del dispositivo in tempo reale.

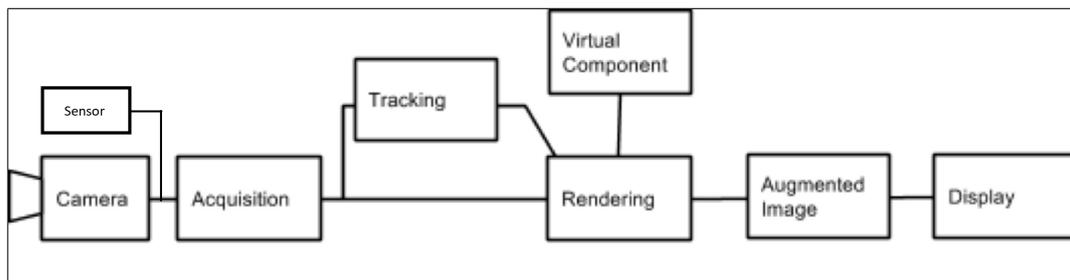


Figura 2.5: Schema concettuale dei dispositivi hand-held

Il vantaggio maggiore di questa modalità di realtà aumentata dipende dal fatto che utilizza dispositivi comuni e accessibili a tutti. Grandi aziende come Intel o Lenovo hanno cominciato a sviluppare per esempio tablet e smartphone con supporto alla tecnologia project Tango sviluppata da Google in questo ambito.

Questo tipo di soluzione presenta però alcuni svantaggi dovuti ai vincoli fisici dell'utilizzatore che deve sempre tenere il dispositivo portatile di fronte, nonché all'effetto di distorsione prodotto dalle fotocamere non professionali dei dispositivi mobili

2.3.3 Modalità proiettiva

La realtà aumentata proiettiva, invece del metodo abituale in cui una superficie esterna è sovrapposta a immagini digitali attraverso la fotocamera di un dispositivo, proietta le immagini su superfici esterne.

L'azienda Metaio, fondata nel 2003 in Germania e acquistata nel 2015 da Apple, ha creato un sistema che visualizza dati di progettazione 3D direttamente sulla superficie esterna di un veicolo.

Definendo la posizione di un proiettore in relazione alla posizione di un'automobile, viene proiettata la struttura interna dei vari componenti sulle superfici del veicolo senza doverlo smontare.

Grazie ad una camera utilizzata per mappare l'ambiente circostante, le immagini proiettate rimangono conformi alle superfici sulle quali vengono proiettate anche se queste vengono spostate all'interno dell'ambiente.

Questo metodo di realtà aumentata è perfetto per la visualizzazione di componenti nascosti durante la formazione di esperti di riparazione automobilistica.

Il complesso funzionamento interno di automobili e macchinari può essere infatti facilmente visibile e spiegato in modo più efficiente rispetto agli approcci convenzionali come si può vedere in figura 2.6.



Figura 2.6: Proiezione dei componenti interni di un'automobile

Un primo limite posto da questo tipo di soluzione dipende dal fatto che i proiettori utilizzati, non essendo integrati nei dispositivi, non permettono lo sviluppo di applicazioni simili a quelle sviluppate con le modalità precedentemente descritte che permettono all'utente di potersi muovere nello spazio.

Solitamente i proiettori vengono utilizzati in ambienti chiusi con luce ridotta non risentendo della scarsa intensità luminosa delle immagini proiettate. In un ambiente aperto e luminoso, sicuramente la scarsa intensità luminosa rappresenta uno svantaggio rispetto a dispositivi see-through e hand-held.

2.4 Confronto tra dispositivi e tecnologie

Negli ultimi anni, grazie ad un aumento dell'interesse per la realtà aumentata, sono stati sviluppati moltissimi dispositivi che supportano questa tecnologia.

Esistono caschetti indossabili, occhiali e dispositivi portatili come smartphone e tablet in grado di comprendere lo spazio intorno all'utente e supportare quindi tecnologie come realtà aumentata, virtuale e mista.

Nel 2014 è stato annunciato Project Tango, sviluppato dall'Advanced Technology and Projects team di Google.

Project Tango è una piattaforma di realtà aumentata che utilizza la Computer Vision per consentire ai dispositivi di rilevare la loro posizione rispetto all'ambiente circostante senza utilizzare dati GPS ma sfruttando unicamente la fotocamera integrata.

Google ha prodotto due dispositivi, un tablet da 7 pollici e uno smartphone, per dimostrare la tecnologia di Tango.

Visto il grande successo di questi dispositivi, acquistati soprattutto da ricercatori e sviluppatori software, nel 2015 Qualcomm e Intel hanno iniziato a sviluppare dispositivi di riferimento a Tango.

Successivamente, nel 2016, Google ha annunciato una partnership con Lenovo per rilasciare uno smartphone con supporto per Tango e rivolto ai consumatori.

La tecnologia Tango è diversa da altri prodotti di Computer Vision in quanto è progettata per funzionare su smartphone e tablet ed ha come scopo principale quello di determinare la posizione e l'orientamento del dispositivo nell'ambiente e utilizzare questi dati all'interno delle varie applicazioni.

Il software funziona integrando principalmente tre tipi di funzionalità rappresentate in figura 2.7:

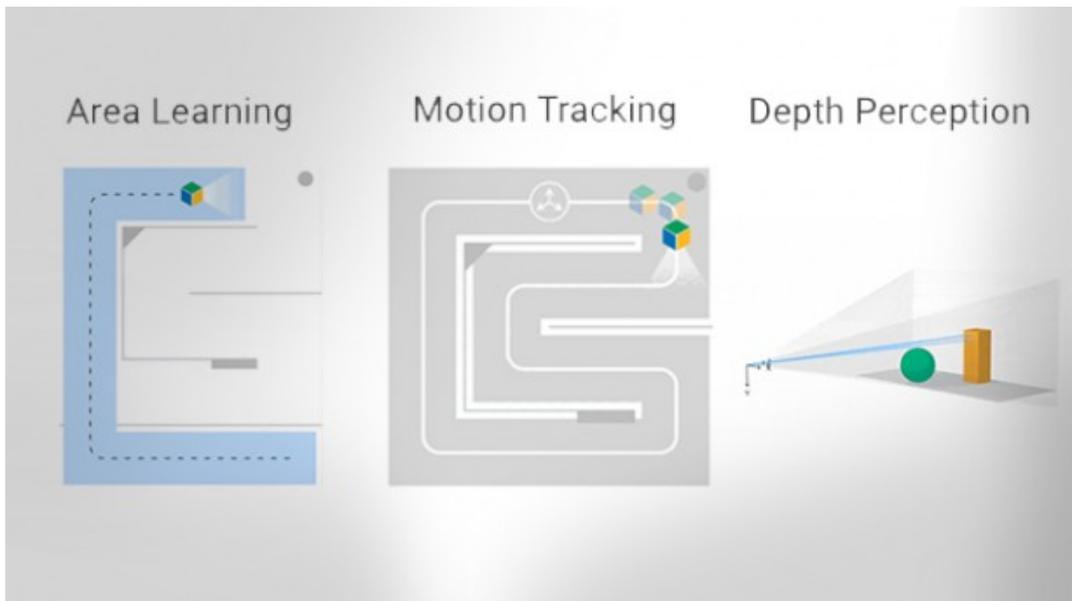


Figura 2.7: Rappresentazione delle funzionalità principali di Project Tango

- **Area learning:** memorizza i dati dell'ambiente in una mappa che può essere condivisa con altri dispositivi Tango per essere arricchita, perfezionata ed utilizzata per gestire l'interazione con gli oggetti reali a seconda dei movimenti dell'utente.
- **Motion tracking:** combina le caratteristiche visive dell'ambiente con i dati di accelerometro e giroscopio per tracciare i movimenti del dispositivo nello spazio e conoscere ad ogni istante la posizione e l'orientamento dell'utente e quindi del dispositivo.
- **Depth perception:** individua le distanze, le dimensioni e le superfici degli oggetti nell'ambiente in modo da poter garantire all'utente un'esperienza più immersiva e realistica.

Queste tre funzionalità insieme generano informazioni tridimensionali dettagliate sull'ambiente e dati in sei gradi di libertà, 3 di orientamento e 3 di movimento.

Le applicazioni che sfruttano Tango, per fruire di questi dati, utilizzano API in C e Java. Sono state inoltre sviluppate API per l'integrazione di Tango con il motore grafico Unity.

Sono molte le applicazioni disponibili per i dispositivi che supportano Tango, applicazioni museali come per esempio l'applicazione Detroit Institute of Arts, creata apposta per rendere la visita di un museo di Detroit più ricca con la possibilità di vedere dettagli in realtà aumentata tramite un tablet Lenovo.

Altri esempi di applicazioni servono per arredare virtualmente a proprio piacimento gli interni come mostrato in figura 2.8 o prendere misure di oggetti come si può vedere in figura 2.9.



Figura 2.8: Arredamento interni con l'app Wayfair

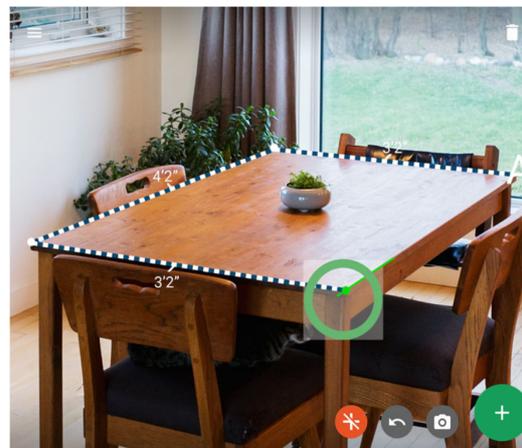


Figura 2.9: App Measure per misurare oggetti

Potenzialmente Tango è un ottimo prodotto in quanto sfrutta dispositivi accessibili a chiunque in termini di costi, risulta però inferiore a dispositivi come Microsoft HoloLens e Meta 2 in quanto veri e propri computer olografici dotati quindi di una potenza di calcolo nettamente superiore a semplici dispositivi come smartphone e tablet.

Un'altra caratteristica che rende più utilizzabili i caschetti indossabili è dovuta proprio al fatto che, essendo indossabili, consentono all'utente di avere le mani libere per eseguire altre azioni contemporaneamente.

Come accennato in precedenza, attualmente due dei dispositivi di realtà aumentata più performanti sono Microsoft HoloLens e Meta 2.

Il primo è stato rilasciato sul mercato in versione sviluppatore già a marzo 2016 mentre il secondo, annunciato a marzo 2016, ha iniziato le vendite soltanto a metà dicembre 2016.

Sono due gli aspetti importanti che fanno di Meta 2 un prodotto potenzialmente dirompente nell'ambito della realtà aumentata nonché diretto concorrente di Microsoft HoloLens: le dimensioni del visore e il FOV (Field Of View).

Il primo infatti è ampio, avvolgente e completamente trasparente, due caratteristiche che offrono vantaggi all'apparenza banali ma che fanno la differenza.

Per prima cosa infatti Meta 2, mostrato in figura 2.10 consente di indossare gli

occhiali da vista anche col visore, questo significa che chi lo utilizzerà ad esempio in ambito lavorativo non sarà costretto a utilizzare quotidianamente delle lenti a contatto, che non tutti gli occhi sopportano, soprattutto per un'intera giornata lavorativa.

Lo schermo ampio inoltre offre altri due vantaggi non da poco: mantenere un contatto naturale con l'ambiente che ci circonda e col quale dunque si può continuare a interagire normalmente e avere un contatto visivo con gli interlocutori, importantissimo in tutti quegli ambiti di utilizzo, come presentazioni di prodotti o contatti commerciali, in cui anche se a distanza, è indispensabile potersi guardare in faccia.



Figura 2.10: Meta 2

L'interazione con gli ologrammi è forse l'area in cui i due dispositivi differiscono di più.

Sia HoloLens che Meta 2 sono in grado di riconoscere la mano dell'utente e utilizzare i gesti come input senza dover disporre di dispositivi aggiuntivi.

HoloLens mantiene le classiche interfacce punta e clicca permettendo all'utente di interagire con una serie di gesti predefiniti e comandi vocali, analizzati più avanti.

Meta 2 invece, per semplificare l'interazione, cerca di non introdurre limiti nei gesti che l'utente può effettuare in modo da rendere l'esperienza il più reale possibile.

Più nel dettaglio, l'utente può compiere i gesti che compirebbe per interagire con oggetti reali come spingere il dito in avanti per premere un pulsante o chiudere la mano attorno ad un oggetto per afferrarlo.

Per quanto riguarda la distanza degli ologrammi, entrambi consigliano di non posizionarli più vicini di mezzo metro e più lontani di 5 metri in quanto ciò provocherebbe fastidio e stress ai muscoli oculari.

Il tracking è una delle caratteristiche più importanti infatti se l'utente posiziona un oggetto in un punto preciso dello spazio, si aspetta che rimanga lì indipendentemente dalla distanza tra l'oggetto e l'utente come avviene nella realtà.

Ciò però è un risultato estremamente difficile da ottenere con la realtà aumentata in quanto anche il minimo spostamento di un ologramma verrebbe subito notato dalla

mente umana, addestrata per prevedere questo tipo di comportamento.

Per mantenere quindi l'illusione della realtà, il dispositivo deve essere estremamente preciso nel seguire anche il minimo movimento della testa in qualsiasi direzione.

Microsoft è riuscita ad ottenere ottimi risultati dotando HoloLens di quattro telecamere di comprensione ambientale, un'unità di misura inerziale (IMU) e un'unità di elaborazione olografica.

Meta 2 invece non ha ancora raggiunto la perfezione a causa della latenza presente tra il movimento della testa dell'utente e l'aggiornamento dei fotogrammi dell'applicazione.

Un altro aspetto importante è la possibilità di collaborazione tra più utenti nello stesso spazio olografico. Sia Meta che HoloLens hanno mostrato esempi di più utenti che collaborano. Meta ha mostrato una demo in cui due utenti si passavano un ologramma tra le mani.

Microsoft ha invece presentato la collaborazione tra costruttori, ingegneri o addirittura scienziati che studiano la superficie di Marte.

Alcune di queste demo sono state mostrate con entrambi i partecipanti nello stesso spazio fisico, altre prevedevano una collaborazione a distanza.

Microsoft sta sviluppando una versione speciale di Skype per HoloLens, pilotata dalla Stazione Spaziale Internazionale. Gli astronauti potranno chiamare gli esperti a terra in caso di guasti o malfunzionamenti per mostrare direttamente ciò che vedono attraverso la telecamera anteriore del dispositivo.

L'aspetto interessante è che gli utenti a terra non avranno nemmeno bisogno di un HoloLens, solo un'applicazione Skype speciale che gli permetta di disegnare direttamente nello spazio 3D dell'astronauta.

Un ultimo confronto può essere fatto sulla grafica dei due dispositivi.

Il campo di vista, l'area davanti all'utente che contiene gli ologrammi, è molto importante per quanto riguarda realtà aumentata e mista in quanto più è ampio, maggiore sarà l'area in cui l'utente potrà posizionare gli ologrammi rendendo l'esperienza più realistica; se gli ologrammi sparissero appena l'utente sposta la testa, l'illusione della realtà sarebbe spezzata immediatamente.

Fin dalla sua presentazione, il campo di vista di HoloLens è stata oggetto di critiche. Secondo la documentazione, HoloLens ha più di 2500 punti luce (pixel) per radiante, ciò significa che può visualizzare circa 43,6 punti per grado.

La risoluzione delle lenti è di 1268x720p (per occhio) ciò significa che il dispositivo possiede campo di diagonale di circa 35°.

Meta 2 invece offre un angolo di campo visivo di 90°, circa triplo rispetto a quello consentito dal principale concorrente della Microsoft.

In termini di prestazioni i due dispositivi non sono ovviamente paragonabili in quanto a differenza di HoloLens che non necessita di collegamenti a computer per funzionare, Meta 2 essendo cablato, dispone di una potenza pressoché illimitata in quanto dipendente dal computer a cui è collegato.

Il collegamento via cavo di Meta 2 pone però un limite al raggio d'azione dell'utente. Il cavo di circa 3 metri limita inoltre molto anche la tipologia di applicazioni sviluppate per Meta 2 che, dovranno essere pensate per funzionare in un'area molto ristretta.

A differenza di HoloLens infatti non potranno essere sviluppate applicazioni che prevedono movimenti dell'utente in aree troppo grandi o in luoghi ristretti e scomodi in quanto difficilmente permetterebbero la presenza di un computer a cui collegare

il dispositivo.

Ecco perché finora HoloLens è il dispositivo di realtà aumentata che ha ottenuto il maggior successo nonostante il prezzo di circa 3000 \$, di gran lunga superiore al prezzo di Meta 2 che si aggira intorno ai 1000-1500 \$.

2.5 Microsoft HoloLens e la mixed reality

Il lavoro di tesi prevede l'utilizzo del visore sviluppato da Microsoft. In questo capitolo verranno approfondite le caratteristiche hardware e software di questo dispositivo.

È bene prima evidenziare le differenze tra realtà aumentata, virtuale e mista dato che il progetto HoloLens si sta evolvendo verso la realtà mista.

Essa cerca di unire gli aspetti migliori della realtà aumentata con quelli della realtà virtuale.

Consente infatti all'utente di vedere il mondo reale così come la realtà aumentata permettendo inoltre l'aggiunta di oggetti virtuali che verranno posizionati in un ben preciso punto dello spazio.

Anche se la realtà aumentata e quella mista possono sembrare uguali, in realtà presentano delle caratteristiche ben distinte. La prima è una sovrapposizione di contenuti nel mondo reale.

Questi contenuti sono informazioni di tipo digitale come per esempio foto, video o dati GPS e non sono ancorati al mondo reale.

Un limite della realtà aumentata è rappresentato dal fatto che i contenuti visualizzati non sono in grado di interagire con gli oggetti del mondo reale.

La realtà mista permette invece all'utente di visualizzare oggetti 3D virtuali e supera il limite della realtà aumentata consentendo a tali contenuti di interagire in tempo reale con gli oggetti del mondo che ci circonda.

La realtà mista grazie a queste caratteristiche è quella che potrà avere il maggiore sviluppo in futuro.

2.5.1 Specifiche tecniche

HoloLens è un visore indossabile di mixed reality che presenta tutte le caratteristiche necessarie per essere definito un vero e proprio computer olografico.

Il dispositivo, rappresentato in figura 2.11, dispone del sistema operativo Windows 10 a 32 bit ed è dotato di un processore quad core Intel Atom x5-Z8100 a 1,04 GHz, 2 GB di memoria RAM, 64 GB di spazio di archiviazione, GPU e HPU ovvero un'Holographic Process Unit utilizzata per processare i dati dei vari sensori e gestire attività come la mappatura dello spazio circostante, il riconoscimento di gesti e quello di comandi vocali.

HoloLens non richiede nessun collegamento via cavo per connettersi a PC durante il funzionamento quindi integra una batteria che permette un utilizzo medio che va dalle 2,5 ore con un uso intensivo, alle 5,5 ore per un uso base.

La caratteristica più rilevante di HoloLens è la capacità di analizzare il mondo circostante grazie a diversi sensori integrati nella Inertial Measurement Unit (IMU)

come accelerometro, giroscopio e magnetometro in aggiunta a quattro camere per interpretare lo spazio più una camera di profondità e 4 microfoni.

Monta lenti olografiche see-through che permettono di sovrainporre gli oggetti virtuali a quelli del mondo reale.

Le applicazioni sviluppate per HoloLens si basano su Universal Windows Platform UWP ovvero un'architettura applicativa che permette lo sviluppo di applicazioni universali cioè eseguibili su gran parte dei sistemi creati da Microsoft senza la necessità di essere riscritte e adattate alla singola piattaforma.

HoloLens permette di eseguire due tipi di applicazioni: 2D e olografiche.

Quelle 2D sono le classiche applicazioni eseguite su un normale computer come per esempio la visualizzazione di foto o altre app desktop come per esempio Skype.

Le olografiche invece, realizzabili grazie alla piattaforma integrata Windows Holographic, creano un proprio spazio olografico all'interno del quale verranno eseguite le funzionalità dell'applicazione permettendo ad esempio di interagire con oggetti 3D spostandoli e modificandoli.



Figura 2.11: Microsoft HoloLens

Gli ologrammi vengono integrati nell'ambiente circostante dopo che esso è stato scansionato ed elaborato dalle camere del dispositivo.

La posizione e la dimensione di questi oggetti è gestita grazie all'uso di sistemi di coordinate con un significato reale nell'ambiente circostante.

2.5.2 Parametri di qualità principali

Esistono diversi parametri per poter valutare la qualità e la stabilità dei contenuti virtuali posizionati.

- **Accuratezza:** una volta che l'ologramma è ancorato nello spazio, dovrà rimanere dove è stato collocato, rispetto all'ambiente circostante, indipendentemente dai movimenti dell'utente o dai cambiamenti nell'ambiente. L'accuratezza misura quindi la precisione con cui gli oggetti virtuali rimangono fissi.
- **Jitter:** misura la stabilità dei contenuti virtuali. A volte può infatti succedere che gli ologrammi siano tremolanti a causa delle impostazioni del sensore di HoloLens o di un monitoraggio non corretto dell'ambiente circostante.

- **Judder:** è un fenomeno causato da frame rate bassi che provocano un movimento irregolare degli ologrammi che si sdoppiano ; questo è particolarmente evidente in ologrammi in movimento.
- **Deriva:** rappresenta un allontanamento degli ologrammi che si distanziano dalla loro posizione originaria. Ciò avviene quando i contenuti virtuali sono posizionati lontani da ancoraggi spaziali o in zone dell'ambiente non completamente mappate.
- **Swim:** si verifica quando gli ologrammi non sono posizionati sul piano di stabilizzazione o quando il dispositivo non è calibrato correttamente per l'utente. Questo fenomeno fa sì che la posizione gli ologrammi venga influenzata dal movimento della testa dell'utente.
- **Separazione dei colori:** si verifica ogni volta che un utente guarda un ologramma in movimento o esegue movimenti bruschi con la testa. In questi casi i bordi dei contenuti virtuali si separano nei loro colori costitutivi, producendo un effetto arcobaleno. Il grado di separazione dipende dalla velocità dei movimenti.

2.5.3 Field of view

Per quanto riguarda le interfacce utente realizzate per dispositivi indossabili di realtà aumentata, la loro posizione rappresenta una delle caratteristiche più importanti nello sviluppo.

Il sistema visivo umano ha un campo visivo binoculare di circa 200-220° in orizzontale e 130-135° in verticale.

Ovviamente però non tutte le zone del campo visivo, rappresentate in figura 2.12, sono comodamente visibili.

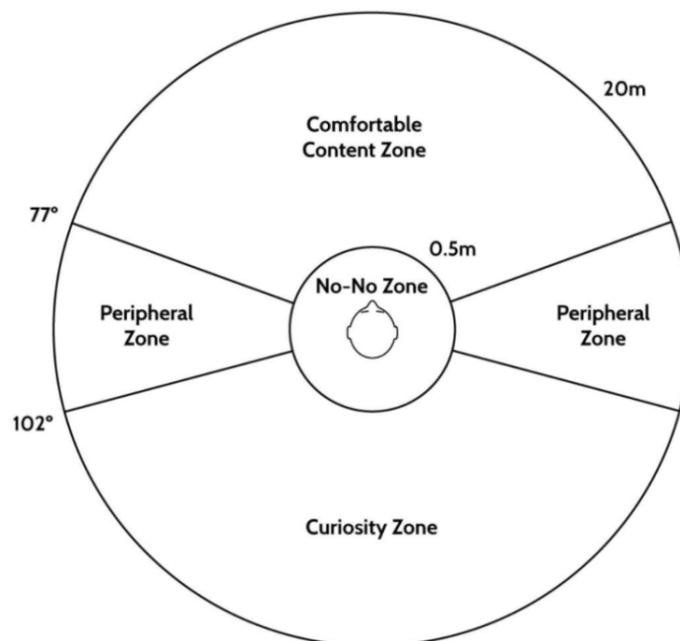


Figura 2.12: Aree del campo visivo umano

Come si può notare, la zona di confort è di circa 150° , la restante parte del campo di vista è composta dalle zone periferiche, ancora visibili ma non agevoli come la zona di confort.

Ovviamente nel caso di applicazioni di realtà aumentata si deve tener conto sia di questi dati sia delle caratteristiche del dispositivo.

Il campo visivo di HoloLens è di 30° in orizzontale e circa 18° in verticale.

Questi dati rappresentano un'ulteriore limitazione dello spazio disponibile e adatto a mostrare gli ologrammi.

Sempre in figura 2.12 si può notare una no-zone attorno al viso dell'utente dove è sconsigliato posizionare contenuti virtuali.

La figura 2.13 rappresenta la zona ottimale in cui posizionare i vari oggetti virtuali per un'esperienza utente migliore.

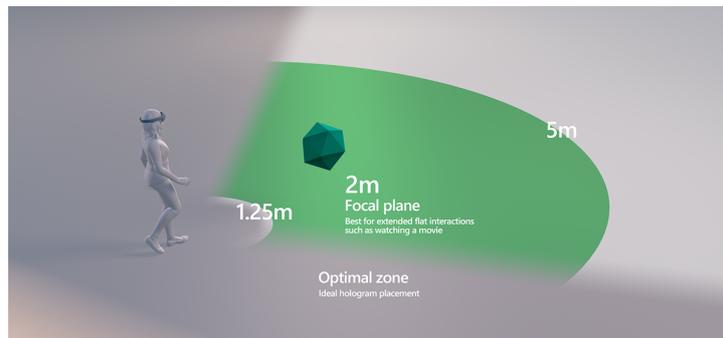


Figura 2.13: Distanze ottimali per il posizionamento dei contenuti virtuali

La convergenza e l'accomodazione sono caratteristiche uniche perché sono legate al modo in cui gli occhi cambiano conformazione per percepire correttamente oggetti a diverse distanze.

Nella visione naturale, queste due caratteristiche sono fra loro legate. Quando gli occhi guardano qualcosa vicino (ad esempio il naso), si incrociano e si adattano ad un punto vicino.

Quando invece guardano qualcosa posizionato distante dall'utente, l'accomodazione tende ad un punto proiettato all'infinito.

In generale sono due meccanismi che permettono una visione nitida e stereoscopica indipendentemente dalla distanza degli oggetti osservati.

Dato che il display di HoloLens è calibrato ad una distanza ottica di circa 2,0 metri dall'utente, quest'ultimo potrà percepire un'immagine nitida e stabile fino a quella distanza.

Contenuti posizionati ad una distanza maggiore sono comunque visibili ma potrebbero causare disagio per l'utente.

Il posizionamento di contenuti a 2,0m è anche vantaggioso perché i due display sono progettati per sovrapporsi completamente a questa distanza.

Altri due parametri fondamentali per un corretto posizionamento dei contenuti sono i valori dei due piani di clipping.

Questi, sono due piani virtuali che delimitano l'area in cui possono essere visualizzati contenuti. Oggetti posizionati al di fuori di questa zona, non saranno infatti visibili.

Per il massimo comfort è consigliato posizionare il piano di clipping più vicino ad

una distanza di circa 85 cm con fadeout dei contenuti a partire da 1 m. HoloLens esegue una sofisticata tecnica di stabilizzazione olografica assistita. Questa è in gran parte automatica ed è relativa ai movimenti della testa dell'utente. Un solo piano, chiamato piano di stabilizzazione, viene scelto per stabilizzare il più possibile i contenuti virtuali. Mentre tutti gli oggetti presenti nella scena ricevono una certa stabilizzazione, quelli nel piano di stabilizzazione ricevono la massima stabilizzazione hardware.

2.5.4 Interpretazione dello spazio

Sono 3 i concetti principali utilizzati per collocare e gestire il movimento degli ologrammi nello spazio: Stationary frame of reference, Attached Frame of reference e spatial anchors.

Stationary frame of reference

È il punto di riferimento calcolato a seconda della posizione del dispositivo e utilizzato per collocare gli ologrammi nello spazio.

Questo riferimento permette di mantenere fissi gli oggetti in un determinato punto del mondo, anche se il dispositivo si muove, calcolando un vettore distanza tra il punto di riferimento e il punto in cui viene collocato l'oggetto.

Con lo spostamento, il dispositivo acquisirà nuovi dati riguardanti lo spazio circostante e potrà quindi migliorare la posizione degli oggetti causando però piccoli spostamenti dalla loro posizione iniziale.

Per risolvere questo problema sono stati introdotti gli spatial anchors.

Gli oggetti collocati in modo stazionario nel mondo sono anche definiti World locked content.

Attached Frame of reference

È il frame di riferimento che si sposta insieme all'utente e serve per legare il movimento degli ologrammi a quello dell'utente.

Questo può essere fatto in due modi diversi:

- In un caso gli oggetti sono legati al movimento della testa in modo che l'utente li abbia sempre di fronte a sé anche quando si gira e si sposta nello spazio. Questa modalità è sconsigliata perché intrusiva in quanto occlude costantemente il campo di vista dell'utente.
- Una seconda modalità permette di fissare gli oggetti in modo tale che rimangano sempre in una posizione relativa al corpo dell'utente seguendolo anche negli spostamenti.

Spatial anchors

Sono punti fissi nello spazio calcolati a partire dalla distanza tra il frame di riferimento e il punto in cui viene collocato un oggetto andando poi a definire un nuovo sistema di coordinate locali fisso per quel determinato punto.

Gli spatial anchors come accennato in precedenza vengono utilizzati per far sì che le posizioni degli oggetti non vengano continuamente aggiornate e modificate dal

dispositivo a seguito di uno spostamento.

Questi punti possono essere salvati in modo che alla riaccensione del dispositivo non si perdano le informazioni in memoria legate ad essi.

Un altro vantaggio è rappresentato dalla possibilità di condividere fra più dispositivi le informazioni relative a questi punti; ciò può essere utile nel caso in cui vengano sviluppate applicazioni che permettono di condividere l'esperienza di più utenti con gli stessi ologrammi.

2.5.5 Modalità di input

HoloLens consente all'utente di interagire con le applicazioni grazie a comandi forniti con diverse modalità di input.

È fondamentale introdurre il concetto di gaze, considerato come il primo tipo di input utilizzato dall'utente. Il gaze è un cursore che rappresenta la direzione di vista dell'utente.

A differenza della realtà non si basa sulla direzione degli occhi ma sulla posizione della testa.

Questo tipo di cursore viene utilizzato come sistema di puntamento per identificare gli oggetti con i quali l'utente vuole interagire.

Per rappresentare questo cursore nello spazio, viene effettuato un raycasting da parte dell'applicazione tracciando un raggio immaginario che, partendo dalla posizione e dall'orientamento della testa, andrà ad intersecare eventuali oggetti posti di fronte all'utente come si nota in figura 2.14.

Una volta individuato l'oggetto con cui si vuole interagire, si possono impartire due tipi di input: gesture input e vocal input.

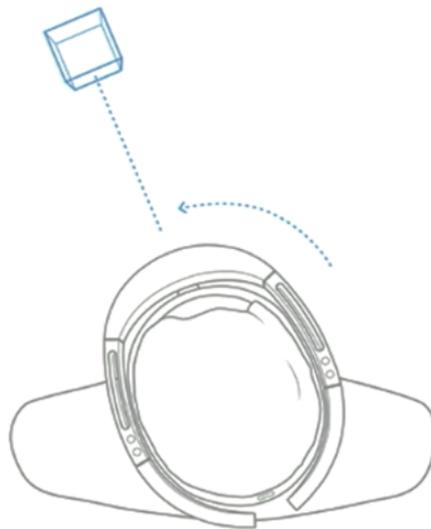


Figura 2.14: Raycasting del dispositivo

Gesture input

Una delle caratteristiche più innovative del visore di Microsoft è la possibilità di interagire con gli oggetti 3D tramite gesti.

Esistono diversi tipi di gesti riconosciuti dal dispositivo ed ognuno corrisponde ad

una azione specifica.

HoloLens riconosce questi tipi di gesti in una porzione di spazio a forma di cono posta di fronte al dispositivo e conosciuta come *gesture frame* in figura 2.15.

I gesti sono una delle caratteristiche più importanti di HoloLens in quanto permettono all'utente di interagire con gli oggetti senza dover tenere in mano un dispositivo come per esempio un telecomando o un joystick che possa essere riconosciuto e tracciato dal caschetto.

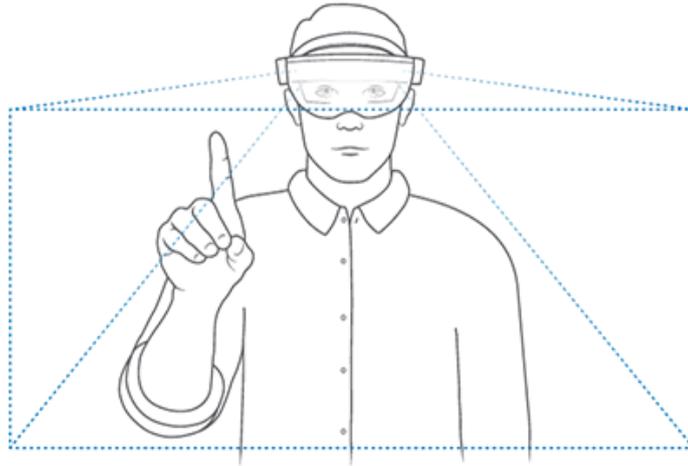


Figura 2.15: Gesture frame

- **Select:** è il gesto principale, il più semplice a disposizione dell'utente. Questo tipo di gesto rappresenta il click del mouse per selezionare o interagire con l'oggetto puntato dal cursore.

Può essere eseguito ponendo la mano chiusa davanti al visore con il dorso rivolto verso il dispositivo e simulando il click con un movimento dell'indice prima verso il basso per poi tornare alla situazione di partenza come per cliccare il tasto del mouse e rilasciare subito dopo.

Una rappresentazione del gesto è riprodotta in figura 2.16. Questo tipo di comando è conosciuto come *press and release gesture*.

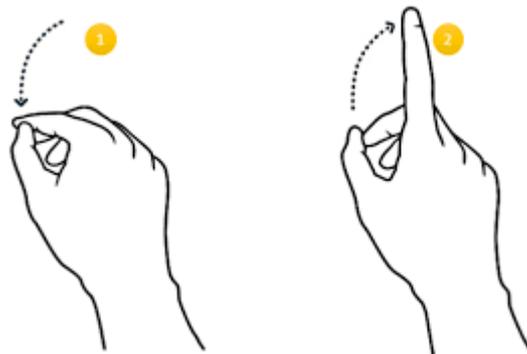


Figura 2.16: Gesto di selezione

- **Home:** è un gesto speciale utilizzato per tornare al menu principale. Per compiere questo gesto, chiamato bloom, l'utente deve porre la mano davanti al dispositivo con le dita unite e rivolte verso l'alto per poi andare ad allargarle come si può notare in figura 2.17.



Figura 2.17: Gesto bloom

- **Manipulation:** è un'azione composta da un gesto di tipo select seguito da un movimento della mano nello spazio. Viene utilizzato per muovere gli oggetti nell'ambiente circostante, ridimensionarli o ruotarli. Il movimento della mano viene tracciato dal dispositivo che calcola e aggiorna la nuova posizione per l'intera durata del gesto.
- **Navigation:** è molto simile al precedente e come lascia intuire il nome, viene utilizzata per scorrere un menu, una pagina web o qualsiasi azione che prevede uno scorrimento. Potrebbe sembrare una replica del gesto precedente nel caso dello spostamento di un oggetto, però, a differenza del precedente, è meno preciso e quindi sconsigliato per azioni che richiedono una accuratezza maggiore.

Vocal input

I comandi vocali non sono sicuramente una novità in quanto presenti ormai sulla maggior parte dei dispositivi elettronici.

In particolare, quelli basati su sistema operativo Windows, permettono all'utente di interagire con l'assistente Cortana per chiederle di eseguire azioni come scattare una foto, registrare un video, effettuare una ricerca su internet, riavviare il dispositivo oppure lanciare un'applicazione.

I comandi vocali possono essere utilizzati anche in sostituzione dei gesti per interagire con gli ologrammi; il comando vocale select, ad esempio, seleziona l'oggetto puntato dal cursore allo stesso modo del gesto di selezione.

Oltre ai comandi vocali in sostituzione dei gesti classici, l'utente può impartire qualsiasi tipo di ordine che preveda un'azione a patto che il comando e l'azione siano definiti a priori in fase di sviluppo.

2.5.6 Spatial mapping

HoloLens vuole unire al mondo reale gli oggetti virtuali e, per far questo, viene utilizzato il concetto di spatial mapping.

Come detto in precedenza, il dispositivo è in grado di mappare completamente l'ambiente circostante e lo spatial mapping fornisce una rappresentazione dettagliata delle superfici reali attorno all'utente.

Queste informazioni vengono utilizzate dal dispositivo per rendere l'esperienza dell'utente il più realistica possibile. I due componenti principali utilizzati per la mappatura dell'ambiente sono lo spatial surface observer e la spatial surface.

L'applicazione fornisce allo Spatial Surface Observer uno o più volumi limitanti per definire le regioni dello spazio di cui l'applicazione desidera ricevere i dati spaziali. Per ognuno di questi volumi, la mappatura fornirà all'applicazione un insieme di superfici spaziali.

Ogni superficie spaziale descrive una superficie del mondo reale in un piccolo volume di spazio, identificata da un sistema di coordinate spaziali globali.

Hololens raccoglie e aggiorna continuamente i dati spaziali andando ad aggiornare le superfici spaziali modificandole e migliorandole.

I dati raccolti vengono utilizzati dalle varie applicazioni per diversi scopi: occlusione, posizionamento, simulazione della fisica, visualizzazione e navigazione. In figura 2.18 si può notare la mappatura di un ambiente.

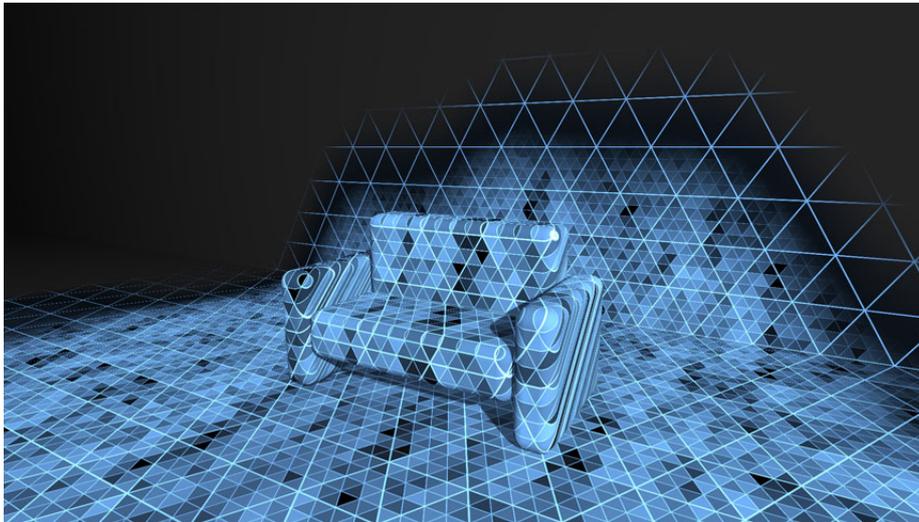


Figura 2.18: Scansione dell'ambiente vista dal dispositivo

- **Occlusione:** in questo contesto i dati spaziali sono usati per rappresentare la giusta interazione tra gli oggetti reali e quelli appartenenti al mondo olografico.

Il dispositivo fornisce dei feedback visivi all'utente per informarlo dell'eventuale occlusione di un ologramma da parte di una superficie reale come per esempio una parete.

L'utente si aspetta infatti che un oggetto olografico si comporti come un oggetto reale nel caso in cui collida con una superficie solida reale.

In alcuni casi però può essere necessario un'interazione con l'oggetto posto per esempio oltre una parete, per interagire l'utente deve necessariamente visualizzare l'ologramma anche se occluso. HoloLens permette per esempio di ridurre la luminosità di questi ologrammi per differenziarli da quelli non occlusi da superfici reali.

In questo modo l'utente sarà in grado di individuare visivamente l'ologramma essendo comunque consapevole del fatto che è occluso da qualcosa.

- **Posizionamento:** i dati raccolti vengono utilizzati per rendere più realistico il posizionamento di oggetti olografici nel mondo reale. Normalmente gli oggetti vengono posizionati in un punto identificato dalle 3 coordinate dello spazio 3D.

Quando invece un oggetto deve essere collocato su una superficie, viene identificato da un punto 2D che specifica la sua posizione rispetto ad essa; in questo modo si facilita e si velocizza il posizionamento in quanto si riduce la quantità di dati che le applicazioni devono elaborare.

La capacità di un'applicazione di utilizzare superfici spaziali per il posizionamento dipende fortemente dalla precisione con cui è stato scansionato l'ambiente circostante.

Se una superficie non è stata scansionata, non può essere utilizzata per il posizionamento poiché risulterebbe incompleta e porterebbe sicuramente ad un errore di posizionamento.

Gli errori di mappatura sono dovuti a zone in cui c'è poco contrasto tra gli oggetti presenti come per esempio stanze buie o ambienti caratterizzati da luce molto intensa.

In caso di mappatura parziale dell'ambiente l'applicazione deve avvisare l'utente in modo che possa essere eseguita una nuova scansione.

Il feedback visivo all'utente è di fondamentale importanza durante il posizionamento. L'utente deve infatti sapere costantemente dove si trova l'ologramma in relazione alla superficie più vicina e capire perché i suoi movimenti siano limitati come nel caso di una collisione con un'altra superficie vicina.

- **Simulazione della fisica:** la simulazione della fisica è forse l'elemento più importante per quanto riguarda il realismo dell'esperienza olografica di un utente.

È importante infatti che gli oggetti olografici interagiscano con quelli reali allo stesso modo in cui lo farebbero due oggetti reali.

Per esempio se l'utente interagisce con un ologramma raffigurante una palla, si aspetta che essa si comporti a tutti gli effetti come una palla reale cioè rotolando e rimbalzando.

Il fattore principale che influenza il realismo della simulazione della fisica è la qualità della scansione dell'ambiente circostante.

- **Visualizzazione:** per la maggior parte del tempo è opportuno che le superfici spaziali siano invisibili per ridurre al minimo il disordine visivo.

Tuttavia, a volte è utile visualizzare direttamente le superfici mappate, anche se le loro controparti nel mondo reale sono già visibili.

Ad esempio se l'utente deve posizionare un oggetto olografico vicino ad una parete, può essere utile visualizzare una specie di ombra per evidenziare la distanza tra l'oggetto e la superficie.

La visualizzazione delle superfici spaziali viene attivata anche nel caso in cui l'utente usi un'applicazione che prevede l'interazione tra oggetti reali e

ologrammi, in questo caso infatti sarebbe utile evidenziare le aree delle superfici reali in cui l'utente deve posizionare gli ologrammi per un corretto funzionamento dell'applicazione.

- **Navigazione:** in questo caso la mappatura può essere utile per creare e visualizzare ologrammi raffiguranti personaggi capaci di muoversi liberamente nel mondo reale come una persona vera. È fondamentale che la scansione dell'ambiente identifichi ed evidenzi le superfici percorribili distinguendole da quelle rappresentanti delle occlusioni per l'oggetto in movimento.

2.5.7 Spatial sound

Nel caso in cui gli oggetti si trovino fuori dal campo visivo dell'utente, il suono è il principale feedback che permette di percepire e capire ciò che sta accadendo nell'ambiente circostante.

L'utilizzo di un suono spazializzato in un'applicazione consente agli sviluppatori di posizionare le sorgenti sonore in uno spazio tridimensionale a forma di sfera attorno all'utente.

In questo modo possono essere simulati suoni degli oggetti, sia reali che olografici, dislocati nello spazio attorno all'utente.

Dato che gli ologrammi sono oggetti composti di luce, la componente sonora aiuta a farli apparire più credibili creando un'esperienza più immersiva, aumentando di intensità se ci si avvicina all'oggetto che emette il suono e diminuendo se ci si allontana.

Al contrario degli ologrammi che sono visibili solo se lo sguardo dell'utente è rivolto all'interno dello spazio olografico, i suoni possono provenire da tutte le direzioni; è proprio questo che fa del suono spazializzato uno strumento fondamentale su cui si basa il realismo dell'esperienza.

È possibile utilizzare il suono ad esempio per richiamare l'attenzione dell'utente su un oggetto momentaneamente non presente nel campo di vista.

Per simulare un suono spazializzato più o meno lontano, il dispositivo deve sostituire il comportamento del sistema uditivo umano che, in base al ritardo e alla direzione con cui percepisce il suono, invia segnali differenti al cervello che li elaborerà per calcolare una posizione più o meno precisa della sorgente.

È bene ricordare che ogni persona percepisce suoni in modo diverso quindi, come tutti i dispositivi che sintetizzano l'apparato uditivo umano, la riproduzione dei suoni spazializzati su HoloLens è basata su calcoli eseguiti in modo da ricoprire la quasi totalità delle funzioni uditive umane.

Un altro impiego dei suoni è quello di dare dei feedback sonori all'utente che sta compiendo gesti o azioni come per esempio la selezione di un oggetto piuttosto che il suo posizionamento.

Capitolo 3

Requisiti del progetto

3.1 Requisiti progetto

Lo scopo del progetto di tesi è quello di progettare e realizzare un'applicazione per supportare operazioni di manutenzione, configurazione e risoluzione dei problemi riguardanti i vari moduli di cui è composta una specifica linea di produzione industriale.

L'applicazione richiesta, deve essere sviluppata su un dispositivo realtà aumentata, nel caso in questione è stato scelto il dispositivo HoloLens di Microsoft.

Sono diversi i motivi che inducono lo sviluppo di un'applicazione di realtà aumentata in ambito industriale: il primo riguarda la possibilità di velocizzare le operazioni di manutenzione e controllo.

Un altro motivo importante è la staticità dei moduli e dei componenti utilizzati per compiere tali operazioni. I vari oggetti virtuali sono infatti posizionati in punti dello spazio ben precisi in quanto l'operatore necessita di un componente specifico sempre in relazione al modulo davanti al quale si trova.

La staticità è riferita anche ai vari moduli della linea di produzione in quanto fissi. Il terzo motivo è legato agli errori che possono essere commessi dall'operatore nello svolgimento delle varie operazioni e che, grazie al supporto fornito dai vari oggetti virtuali, vengono limitati o evitati.

Manuali, schemi elettrici e documentazione relativi ad un modulo specifico, vengono normalmente utilizzati da un operatore quando si trova in prossimità di esso e, salvo casi particolari, non necessitano di essere fruibili da altre parti.

Generalmente, quindi, i componenti relativi ai vari moduli di una linea di produzione non devono essere fruibili in qualsiasi momento.

Gli oggetti virtuali sviluppati per supportare gli operatori durante le diverse operazioni, essendo relativi ad un modulo particolare, una volta posizionati devono rimanere ancorati nella stessa porzione di spazio.

La realtà aumentata grazie alle tecnologie usate per mappare l'ambiente e memorizzare la posizione dei vari contenuti virtuali in esso, è lo strumento perfetto per questo tipo di attività.

3.2 La connessione Internet del sito

L'area occupata dalla linea di produzione è quasi interamente coperta da una connessione Internet Wi-Fi ad eccezione di due dei 15 moduli che la compongono. La velocità nominale della rete è di 4 Mb/s, ma i test sul campo hanno misurato una velocità di 2,5 Mb/s sulla connessione TCP. L'architettura di riferimento utilizzata per il caso in questione è mostrata in figura 3.1.

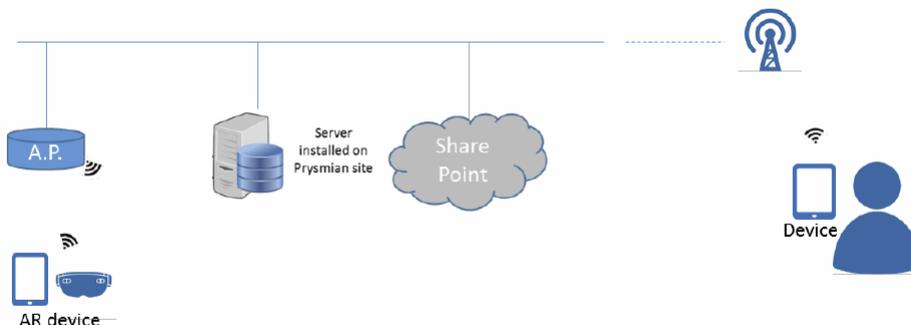


Figura 3.1: Possibile architettura di rete

L'architettura rappresentata nell'immagine, vede il dispositivo di realtà aumentata collegato alla rete Wi-Fi tramite Access Point già presente.

L'idea è quella di installare un server con la funzione di modulo back-end per i client di realtà aumentata dove risiederà la maggior parte dell'intelligenza computazionale; in questo modo l'applicazione potrebbe essere sviluppata, per quanto possibile, indipendentemente dal dispositivo finale utilizzato.

Nella rete è presente un server SharePoint su cui risiederanno tutti i documenti online come manuali e procedure di smontaggio o configurazione, necessari per i casi d'uso riportati più avanti.

Possono inoltre essere stabilite delle connessioni con operatori e tecnici che, utilizzando dispositivi mobili, forniscono assistenza remota sul campo tramite Skype for Business o altri servizi equivalenti.

3.3 Operazioni specifiche degli operatori

La linea di produzione è lunga circa 120 metri e suddivisa in moduli. Alcuni dei moduli presenti sono composti da diversi componenti, certi anche mobili.

L'applicazione deve supportare gli operatori sul campo in modo che, a seconda del modulo davanti al quale si trovano, possano eseguire operazioni specifiche per tale modulo guidate dal dispositivo.

Quando un operatore arriva davanti a una sezione specifica della macchina, il dispositivo di realtà aumentata deve riconoscere automaticamente di quale sezione si tratta mostrando informazioni utili come il nome del modulo, una breve descrizione, i parametri operativi e fornendo all'operatore accesso alla documentazione relativa al modulo come schematizzato in figura 3.2.

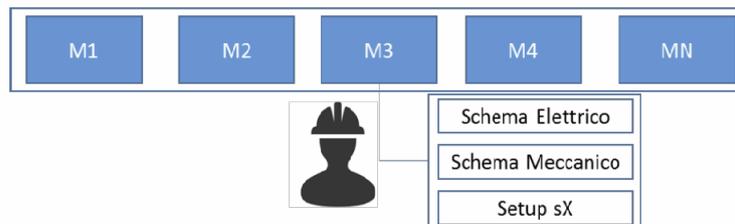


Figura 3.2: Operatore riceve dati del modulo davanti al quale si trova

Quando l'operatore riceve l'identificazione del modulo, recupera tutte le informazioni contestuali da una sezione dedicata dello SharePoint in cui è possibile trovare i documenti sugli schemi elettrici, meccanici e sui parametri di impostazione correlati al modulo.

I documenti potranno essere in diversi formati tra cui: PDF, dwg e ms office, l'applicazione deve quindi essere in grado di interpretare tutti i tipi di file fornendo all'operatore una visualizzazione di tali documenti chiara e veloce da consultare.

Nel caso in cui l'operatore sul campo necessiti supporto per effettuare una particolare procedura di manutenzione o calibrazione, l'operatore remoto riceverà la chiamata sul proprio dispositivo mobile ovunque sia.

La chiamata di assistenza viene effettuata dall'operatore sul campo con il dispositivo mobile di realtà aumentata mentre il tecnico da remoto può fornire l'assistenza necessaria utilizzando dispositivi anche diversi da quello di realtà aumentata utilizzato sul campo.

I vari moduli che compongono la linea di produzione sono composti da diversi sensori, controllori e attuatori; nessuno di questi deve essere in stato d'errore per mantenere la linea di produzione costantemente in esecuzione.

Se anche solo uno di questi componenti non funziona correttamente, la produzione si arresta con conseguente perdita di tempo e gli operatori devono cercare quale dei molti componenti ha causato lo stop, individuare il motivo e riattivare la linea di produzione.

Spesso la ricerca del componente mal funzionante richiede molto tempo in quanto difficile da identificare; ad esempio basta che una leva o tasto di arresto non siano stati sbloccati a seguito di una manutenzione di routine per causare il blocco dell'intero impianto.

I componenti che richiedono più tempo per essere esaminati a seguito di un guasto, sono i quadri elettrici in quanto composti da migliaia di luci e led che devono trovarsi in una ben precisa configurazione per poter funzionare correttamente; individuare i led che si trovano in stato di errore può essere un'operazione molto onerosa in termini di tempo e risorse. HoloLens viene utilizzato per velocizzare la ricerca dei componenti guasti facilitando così la risoluzione dei problemi.

Per ogni modulo sono presenti macchine o parti che devono essere controllate dall'operatore seguendo una procedura specifica, ovvero controllare schemi elettrici, meccanici o informazioni operative sullo stato della macchina.

Un altro utilizzo dell'applicazione AR è quello di supportare gli operatori nella configurazione della macchina con i parametri operativi corretti.

3.4 Compiti principali e struttura generale dell'applicazione

Dalle specifiche presenti nella documentazione fornita sono stati identificati tre casi d'uso principali riguardanti tutte le azioni necessarie per ogni modulo della macchina: controllo di parametri operativi, identificazione dei vari componenti e accesso alla relativa documentazione.

Molti moduli richiedono la visualizzazione dei valori dei componenti e dei parametri operativi per verificare se è necessario una calibrazione o una procedura di manutenzione.

Il dispositivo AR deve inoltre identificare e mostrare all'operatore i vari componenti dei moduli di cui è composta la linea di produzione, mostrare come disattivarli e controllare se sono funzionanti.

Alcuni componenti come ad esempio i quadri elettrici, richiedono che il dispositivo AR mostri la configurazione ideale dei vari elementi per supportare l'operatore nell'identificare un'eventuale situazione di errore.

Dopo aver individuato gli incarichi principali in cui HoloLens deve supportare l'operatore e le risorse di cui necessita per farlo, è stata definita una struttura gerarchica composta da tre elementi principali:

Room: ogni stanza rappresenta un contenitore riferito ad uno dei moduli della linea di produzione. Nella fase di inizializzazione dell'applicazione, per ogni modulo, viene posizionata e ancorata nello spazio una stanza che potrà contenere i vari oggetti virtuali riferiti al modulo della linea di produzione. Ogni stanza è caratterizzata da diverse proprietà:

- Un identificativo univoco;
- Un offset in termini di coordinate (x, y, z) usato per correggere la posizione se la stanza non è stata ancorata con estrema precisione nella fase di inizializzazione;
- Un elenco degli oggetti funzionali contenuti nella stanza;
- Un file di configurazione contenente tutte le informazioni sugli oggetti nella stanza.

Oggetti funzionali: ogni oggetto si riferisce ad un singolo modulo. Questi tipi di oggetti vengono posizionati automaticamente all'interno della stanza ancorata precedentemente e relativamente alla sua posizione.

Come per la stanza, ogni oggetto funzionale presenta diverse caratteristiche:

- Identificativo unico nella stanza;
- Dati spaziali: orientamento e posizione rispetto alla stanza;
- Tipo oggetto;
- Opzione mostra / nascondi per decidere se il componente deve essere visibile nello spazio o meno.

Menù: sono elementi interattivi attraverso i quali l'operatore può recuperare informazioni su oggetti e stanze, decidere di mostrare / nascondere un oggetto e accedere alla relativa documentazione.

Un menù può essere visualizzato in view space o in world space.

- Menù view space: questo tipo di menù è un contenuto legato alla posizione dell'utente in modo da poter seguire i suoi movimenti ed essere sempre visibile e accessibile.
- Menù world space: a differenza del precedente, è un contenuto ancorato, è caratterizzato da una posizione relativa al componente o al modulo a cui si riferisce.

In figura 3.3 è rappresentato un diagramma che mostra le relazioni tra i vari oggetti:

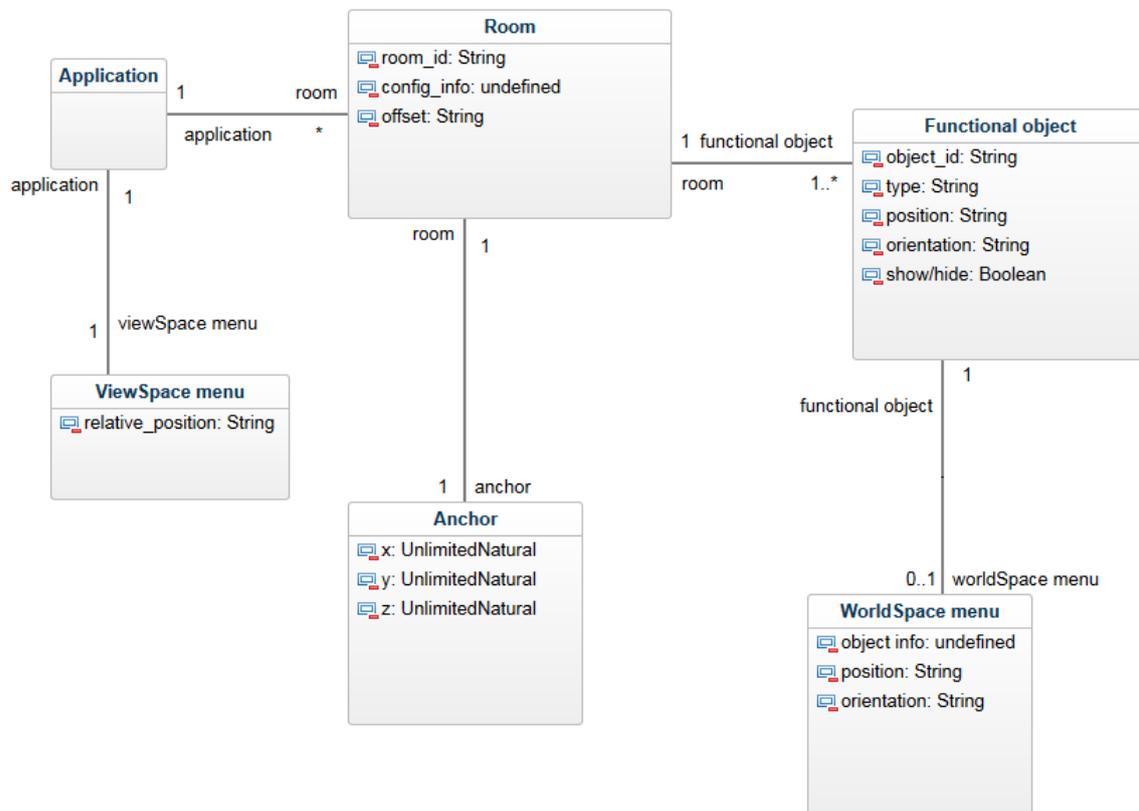


Figura 3.3: Diagramma relazionale dei componenti principali

3.5 Struttura gerarchica delle cartelle

La struttura applicativa definita in precedenza viene tradotta in una struttura gerarchica di cartelle.

Questa gerarchia consiste in una cartella principale contenente tutti i dati di configurazione dell'applicazione e dei suoi componenti.

Al suo interno viene creata una cartella specifica relativa ad ogni stanza presente. Il numero di stanze è legato al numero di moduli della linea di produzione, quindi predefinito.

Ognuna di queste cartelle contiene un file di configurazione contenente tutti i parametri necessari per configurare e posizionare i vari oggetti funzionali presenti all'interno della stanza.

Questo tipo di struttura consente all'utente di aggiungere, modificare o eliminare manualmente i dati relativi a una stanza o agli oggetti contenuti al suo interno.

In particolare, l'utente può definire una nuova stanza e aggiungerla al sistema creando una cartella contenente tutti i dati necessari per descriverla.

3.6 Oggetti funzionali

In questo contesto, è possibile definire diversi tipi di oggetti funzionali configurati diversamente a seconda dell'ambito a cui appartengono.

Gli oggetti funzionali sono gli strumenti principali di cui si può servire l'operatore sul campo per compiere operazioni di manutenzione, revisione e calibrazione.

È doveroso precisare che l'applicazione sviluppata non rappresenta un Interactive Electronic Technical Manual (IETM) ma include diversi componenti virtuali sviluppati per velocizzare le operazioni svolte dagli operatori riducendo al minimo gli errori commessi.

Tra i componenti di supporto è inoltre presente un document browser che, come analizzato nel paragrafo seguente, include anche funzionalità simili a quelle presenti in un IETM utili a reperire informazioni dalla documentazione digitale più velocemente di quanto non lo si possa fare da manuali cartacei.

3.6.1 Document browser

Una delle operazioni più onerose in termini di tempo è la consultazione della documentazione e degli schemi elettrici e meccanici specifici dei vari moduli e componenti della linea di produzione.

Solitamente l'operatore necessita di più manuali per compiere queste operazioni in quanto i vari schemi hanno rimandi ad ulteriori modelli o procedure.

Per semplificare e digitalizzare queste azioni è necessario un componente chiamato document browser che permetta di consultare più velocemente e agevolmente la documentazione.

Questo componente supporta quindi l'operatore in procedure di smontaggio, ricalibrazione di componenti e riparazione mostrando la documentazione corretta per il modulo o il componente specifico.

3.6.2 Procedure guidate

Questo tipo di oggetto, simile nello scopo al precedente, è una lista di controllo in aggiunta alla documentazione per assistere e guidare l'operatore nelle varie procedure mostrando un elenco di operazioni da eseguire in un determinato ordine.

3.6.3 Pannelli informativi

Ogni stanza è caratterizzata da un pannello informativo riassuntivo di tutti i componenti che compongono il modulo.

Ogni componente è dotato di un ulteriore pannello informativo per identificarlo all'interno della stanza e mostrarne le caratteristiche principali.

I pannelli informativi risultano molto utili e importanti per identificare principalmente i componenti più difficili da vedere e riconoscere.

3.6.4 Immagini di riferimento

Alcune situazioni prevedono che l'operatore debba confrontare la configurazione di un determinato componente con immagini o schemi di riferimento raffiguranti la configurazione corretta.

Questo tipo di confronto è richiesto per alcuni moduli particolari in cui l'esame della documentazione è complicato e richiede troppo tempo. L'oggetto in questione consente all'operatore di visualizzare l'immagine o lo schema di riferimento confrontandoli con la configurazione corrente per identificare quale componente si trova in stato di errore.

Per ridurre al minimo i tempi per il confronto e il rilevamento di errori, le immagini di riferimento vengono mostrate dal dispositivo di realtà aumentata sovrapposte al componente reale in modo da notare a colpo d'occhio un'eventuale configurazione errata.

Capitolo 4

Sviluppo e progettazione interfaccia

4.1 Sviluppo e progettazione dell' interfaccia

Il primo passo per la realizzazione dell'interfaccia richiesta dall'applicazione, è stato quello di definire un'architettura sia hardware che software del sistema a fronte dei requisiti raccolti e delle caratteristiche della tecnologia.

Come ambiente di sviluppo per la progettazione dell'interfaccia è stato utilizzato Unity 5.6.1.

Al suo interno sono stati importati due asset principali: Mixed Reality Toolkit e Vuforia.

Di seguito verranno evidenziate le caratteristiche e le funzioni dei due asset analizzando gli script principali di cui sono composti.

4.2 Mixed Reality Toolkit Unity

Il Mixed Reality Toolkit Unity è una raccolta di script e componenti utili per accelerare e facilitare lo sviluppo di applicazioni per Microsoft HoloLens.

Come si può notare dall'immagine 4.1, l'asset creato per essere integrato in Unity fa parte di una struttura applicativa con alla base la piattaforma universale UWP. Gli script contenuti nel Mixed Reality Toolkit riguardano principalmente la gestione degli input gestuali e vocali, di spatial mapping, spatial understanding e di spatial sound.

Per prendere confidenza con la programmazione per HoloLens e gli script integrati nel kit, sono stati di grandissima utilità i tutorial dell'HoloAcademy sviluppati da Microsoft.

Questi accompagnano lo sviluppatore a partire dai primi passi con l'emulatore di HoloLens per Windows 10 fino ad un'esperienza di mixed reality condivisa tra più utenti, passando per tutte le funzionalità di HoloLens.

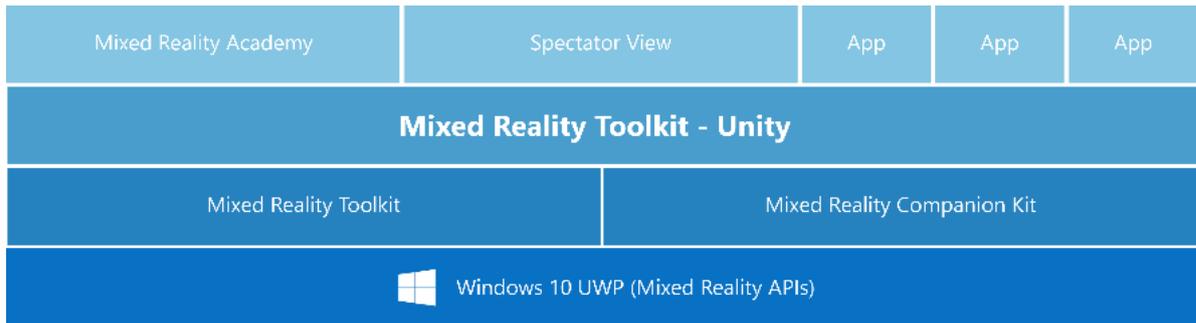


Figura 4.1: Organizzazione dei livelli per lo sviluppo di un' applicazione per HoloLens

4.3 I marker e Vuforia

Vuforia è un kit di sviluppo software avanzato per dispositivi mobili che consente la creazione di applicazioni di realtà aumentata integrando contenuti virtuali nel mondo reale.

Si basa sul riconoscimento di marker tramite la computer vision per acquisire, elaborare, analizzare e mappare le immagini utilizzando dati spaziali del mondo reale. La funzionalità di riconoscimento delle immagini, consente agli sviluppatori di posizionare e orientare oggetti virtuali, come i modelli 3D in relazione alle immagini del mondo reale quando queste vengono riconosciute dalla fotocamera del dispositivo. L'SDK di Vuforia supporta una varietà di target 2D e 3D classificandoli in base alla qualità e alle caratteristiche dell'immagine.

La qualità dei marker dipende da diversi fattori: le differenze di luminosità sono più facilmente rilevabili rispetto alle differenze di cromaticità (colore) in quanto l'illuminazione cambia i colori percepiti rendendo il loro rilevamento più impegnativo.

Il primo obiettivo di un processo di rilevamento dei marker è quello di individuare i contorni dell'immagine deducendo quindi le posizioni degli angoli.

Il secondo passo è quello di riconoscere effettivamente il marker decifrandolo e andando così a posizionare gli oggetti virtuali associato ad esso.

La procedura di rilevamento di marcatori di base consiste nelle seguenti fasi:

- **Acquisizione immagine:** le immagini vengono acquisite tramite la fotocamera del dispositivo utilizzato.
- **Preprocessing:** in questa fase viene processata l'immagine acquisita andando a rilevare le linee presenti e individuando gli angoli del marker.
- **Identificazione e decodificazione del marker nell'immagine:** questa fase è molto delicata in quanto le applicazioni di realtà aumentate mirano all'elaborazione dei contenuti in tempo reale.
- **Calcolo della posa del marker:** la posa è composta da sei gradi di libertà, 3 legati alle coordinate x,y e z dell'orientamento e 3 riferiti agli angoli di rotazione intorno ai tre assi coordinati.

Collegandosi al sito di Vuforia c'è la possibilità di creare un database per contenere le immagini di riferimento che si vogliono usare all'interno della propria applicazione.

Vuforia classifica le immagini caricate assegnando ad ognuna un punteggio da 1 a 5 dove 5 indica un marker di ottima qualità e 1 un'immagine con qualità scadente. Il punteggio viene attribuito a seconda delle caratteristiche invarianti che Vuforia estrae dalle immagini.

In figura 4.2 è riportato l'esempio di un marker con un punteggio di 2 su 5 in quanto le caratteristiche rilevate sono poche.

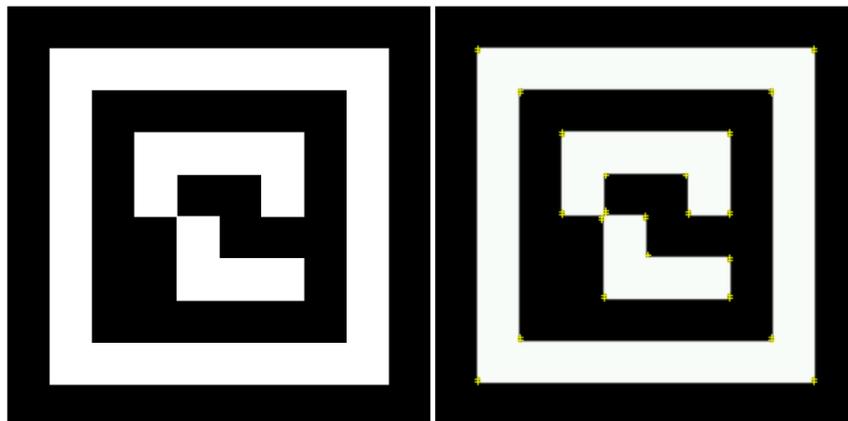


Figura 4.2: Esempio di marker con poche caratteristiche rilevanti

Al contrario, il marker riportato in figura 4.3 è di ottima qualità in quanto presenta un gran numero di poligoni e di intersezioni che permettono all'immagine di essere facilmente riconoscibile.

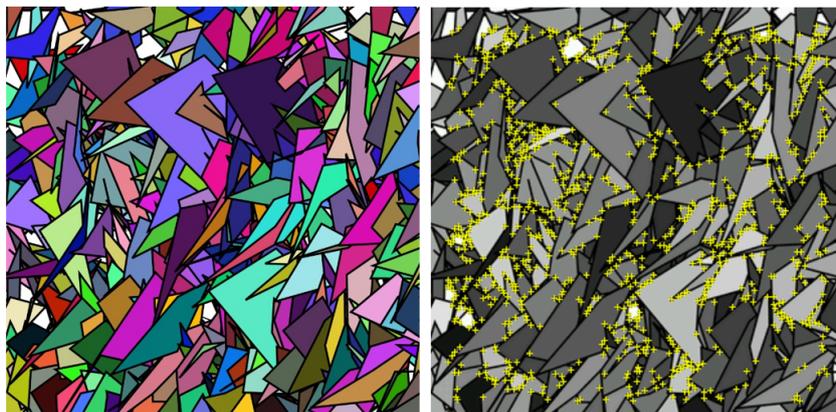


Figura 4.3: Marker classificato come ottimo per le molte caratteristiche rilevate

Una volta caricati tutti i marker necessari per l'applicazione, Vuforia crea e permette di scaricare un asset per Unity composto da un database contenente le immagini di riferimento e le caratteristiche che dovranno essere riconosciute per ognuna.

Importato l'asset in Unity, si devono istanziare e configurare un oggetto camera per riconoscere le immagini e un prefab *image target* che servirà come riferimento per gli oggetti virtuali che dovranno essere mostrati al riconoscimento del marker.

4.3.1 Configurazione delle camere

Oltre alla camera di Vuforia, nella scena sarà presente una seconda camera chiamata HoloLensCamera e predisposta per mostrare i contenuti olografici.

Le due camere devono essere configurate per poter collaborare correttamente; inizialmente si procede con la configurazione della camera di Vuforia.

Il primo parametro richiesto è la license key che si può generare tramite il sito di Vuforia dopo essersi registrati.

Il secondo parametro da configurare riguarda il dispositivo che si andrà ad utilizzare dato che Vuforia ne supporta diversi.

Nel caso in questione si seleziona il dispositivo Microsoft HoloLens e si procede abilitando il database precedentemente scaricato dal sito Internet.

L'ultima configurazione richiesta prevede di definire quale sarà l'origine del mondo.

La camera HoloLens dovrà essere configurata con i parametri corretti per poter funzionare sul dispositivo di realtà aumentata; in particolare si deve predisporre il colore di sfondo come nero, corrispondente a pixel spenti sul display e quindi trasparenti.

Una volta configurato lo sfondo, si deve posizionare la camera nell'origine del mondo tramite il vettore (0,0,0) e configurare i piani di clipping, utili per non affaticare l'occhio dell'utente durante l'utilizzo.

In figura 4.4 sono mostrate le opzioni configurabili spiegate.

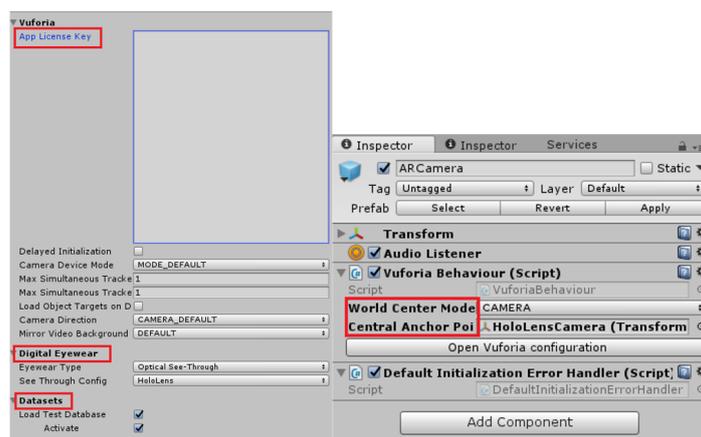


Figura 4.4: Parametri di configurazione delle camere

4.3.2 Configurazione del marker

Terminata la configurazione delle camere, si deve configurare l'*image target* istanziato precedentemente.

La configurazione è molto semplice e richiede unicamente di definire il database e l'immagine in esso contenuta che il dispositivo dovrà riconoscere.

Tale immagine viene poi inserita nel materiale dell'oggetto come mostrato in figura 4.5.

Vuforia permette di gestire e riconoscere più marker ma, l'applicazione progettata prevede l'utilizzo di un unico marker universale per posizionare le varie *room*.

Questo, una volta riconosciuto mostra il modulo virtuale scelto precedentemente da un apposito menù.

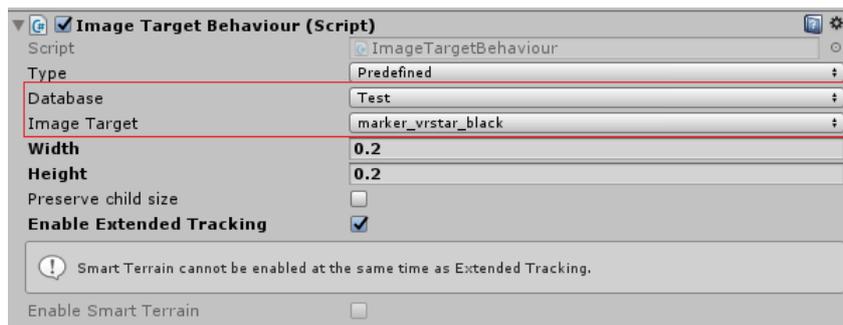


Figura 4.5: Parametri di configurazione dell'Image target

Per fare in modo che al riconoscimento dell'immagine da parte del dispositivo vengano mostrati i contenuti virtuali, si devono impostare tali oggetti come “figli” dell'oggetto target nella gerarchia della scena Unity.

In questo modo al riconoscimento dell'immagine saranno mostrati i contenuti virtuali con posizione scala e orientamento definiti precedentemente in Unity.

Un'opzione molto importante del riconoscimento dei marker è l'extended tracking. Normalmente, i contenuti virtuali vengono mostrati al riconoscimento del marker e nascosti nel caso in cui il marker non fosse più rilevato.

L'extended tracking permette di visualizzare i contenuti virtuali anche quando il marker non è più tracciato dalla camera del dispositivo.

Questa particolare opzione è utile soprattutto quando gli oggetti virtuali sono di grandi dimensioni e non possono quindi essere visualizzati interamente e contemporaneamente al marker.

Il dispositivo, una volta riconosciuto il marker, costruisce una mappa dell'ambiente circostante assumendo che l'ambiente e il marker siano tendenzialmente stabili.

Quando il dispositivo non è più in grado di individuare il marker perché fuori dal campo di vista, riesce comunque a risalire alla sua posizione grazie alle informazioni contenute nella mappa creata.

Ovviamente questo tipo di opzione non funziona correttamente in un ambiente privo di riferimenti e in continua evoluzione.

4.4 Considerazioni generali sullo sviluppo di interfacce utente

I concetti fondamentali alla base della progettazione delle interfacce sono l'augmented cognition e lo user center design.

L'augmented cognition è un particolare campo interdisciplinare di psicologia e ingegneria.

Il suo studio si concentra generalmente sulle attività e gli ambienti in cui esistono interazioni uomo-computer e di conseguenza interfacce utente.

In questi contesti, l'utente è sopraffatto dalle informazioni ottenute da più fonti.

Le limitazioni dei processi cognitivi, in particolare l'attenzione e la memoria, pongono un limite alla capacità del cervello di elaborare e memorizzare tutte le informazioni ricevute.

Uno dei primi passi da compiere per sviluppare le interfacce utente è quello di capire gli obiettivi e le richieste del cliente, comprendendo a fondo competenze, preferenze

e tendenze.

Lo user center design a differenza di altre filosofie di progettazione di interfacce, tenta di ottimizzare il prodotto intorno alle richieste dell'utente piuttosto che costringere gli utenti a cambiare il loro comportamento in base al prodotto.

L'obiettivo principale è quello di mantenere l'interfaccia utente intuitiva e semplice da usare poiché progettata per accelerare le attività che l'utente deve compiere; le interfacce migliori sono quasi invisibili all'utente.

Per ottenere interfacce semplici devono essere utilizzati elementi comuni o che in qualche modo li ricordino, in modo che l'utente possa sentirsi a proprio agio.

Ad esempio quando si inseriscono bottoni o icone, è buona norma utilizzare come texture immagini intuitive piuttosto che scritte esplicative.

Un altro fattore molto importante è il feedback che l'applicazione o l'interfaccia invia all'utente a seguito di un'azione assicurandosi che il sistema comunichi cosa sta succedendo: azioni in corso, errori ecc.

L'interazione con queste interfacce si verifica principalmente con i gesti delle mani cercando di utilizzare gesti comuni che verrebbero usati dall'utente per svolgere le stesse azioni nel mondo reale con oggetti reali.

Ovviamente come approfondito nel capitolo sulla realtà aumentata, HoloLens dispone di un numero limitato di gesti preimpostati; questo è una delle prime limitazioni di cui si deve tenere conto quando si sviluppa la logica di interazione utente-interfaccia.

Un altro limite, dipendente dall'ambiente per cui è stata sviluppata l'applicazione, è il rumore.

In un ambiente industriale infatti, a causa dei rumori dovuti alle macchine in funzione, non possono essere utilizzati comandi vocali complessi in quanto potrebbero essere coperti dai suoni dell'ambiente circostante. Per questo, nello sviluppo dell'applicazione, sono stati definiti pochi comandi brevi, alcuni sostituibili anche da gesti. Anche i feedback, così come i comandi, possono essere di tipo visivo o sonoro; nello sviluppo dell'applicazione è stato tenuto conto questo concetto soprattutto per quanto riguarda i feedback visivi, sempre a causa del rumore presente nell'ambiente circostante.

Il progetto sviluppato è pensato per essere il più flessibile possibile sotto tutti gli aspetti. La flessibilità consente di poterlo utilizzare nuovamente adattandolo ad altri casi d'uso nell'ambito della realtà aumentata in campo industriale.

Qualsiasi linea di produzione composta da diversi moduli è infatti un caso d'uso a cui si possono applicare i componenti sviluppati con i dovuti adattamenti.

4.5 Sviluppo dei componenti

Come accennato nel capitolo precedente riguardante i requisiti del progetto, i componenti principali dell'applicazione sono sostanzialmente cinque: la *room*, il document browser, la checklist, il pannello informativo e il menù.

Di seguito verranno analizzati evidenziando le caratteristiche e le funzioni di ogni componente ed esaminando il processo di sviluppo.

4.5.1 La *room*

Ogni *room* corrisponde ad un modulo della linea di produzione ed è il componente radice nella gerarchia degli oggetti in quanto rappresenta il contenitore di tutti gli

altri.

La struttura delle varie stanze viene creata grazie a file di configurazione contenenti tutte le informazioni necessarie a collocare gli oggetti al suo interno una volta che essa viene posizionata e ancorata nello spazio.

Il posizionamento delle stanze avviene per mezzo di un marker universale integrato tramite Vuforia.

Per far questo, nella fase di configurazione, l'utente tramite un menù a tendina sceglie quale stanza andare a posizionare; una volta selezionata, si attiva il sistema di riconoscimento del marker tramite la camera del dispositivo.

L'utente, posizionato il marker nel punto corrispondente all'origine della stanza, vedrà apparire un modello semplificato del modulo in questione.

La visualizzazione del modello serve come linea guida per aiutare l'utente a posizionare correttamente la stanza.

Grazie all'extended tracking, l'operatore può allontanarsi dal marker per poter visualizzare il modello interamente e determinare se l'allineamento tra esso e il modulo reale è preciso o meno.

Se infatti il posizionamento non avviene con precisione, la stanza risulterà ancorata nel punto sbagliato e l'errore verrà propagato agli oggetti al suo interno in quanto posizionati a partire dall'origine della stanza stessa.

Per rendere effettivo l'ancoraggio della stanza nello spazio, è disponibile il comando vocale *set position*.

Una volta ancorato l'oggetto, se l'utente non è soddisfatto del posizionamento, potrà procedere a riposizionare la stanza ripetendo il procedimento.

Una volta che tutte le stanze disponibili sono state posizionate, il tasto *ok* del menù principale permette di visualizzare le icone degli oggetti contenuti nelle varie stanze e nascondere i modelli posizionati in quanto superflui per lo scopo dell'applicazione come mostrato in figura 4.6.

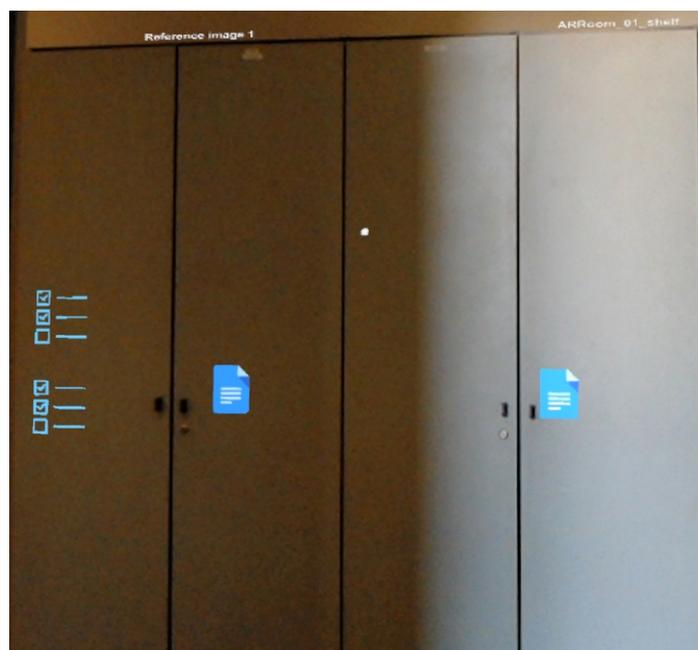


Figura 4.6: Icone appartenenti alla *room* posizionata

L'applicazione permette all'utente di posizionare le varie *room* in fase di setup e

riposizionarle in caso di ancoraggio errato.

Una volta posizionata, una *room*, può essere rimossa solo eliminando la cartella corrispondente nella struttura gerarchica dell'applicazione definita nel capitolo precedente.

Anche eventuali modifiche riguardanti la posizione, l'orientamento, la scala o il contenuto degli oggetti di supporto all'interno di una *room* possono essere effettuate solamente andando a modificare i file di configurazione corrispondenti.

Nell'ottica di un riutilizzo dell'applicazione per casi d'uso differenti, il concetto di *room* può essere usato per identificare oltre ai diversi moduli di una linea di produzione anche macchinari a sé stanti che necessitano operazioni simili a quelle permesse dai vari componenti sviluppati.

4.5.2 Document browser

Il document browser è l'oggetto più complesso tra quelli sviluppati durante il progetto in quanto integra molte funzionalità per rendere la consultazione della documentazione più semplice e veloce.

L'idea di base per cui è stato pensato questo componente, è quella di andare a sostituire schemi e manuali cartacei in quanto, come emerso dagli studi presentati nei primi capitoli, risultano essere ingombranti durante le fasi di manutenzione.

La consultazione digitale di schemi e manuali permette all'operatore di poter svolgere contemporaneamente le operazioni previste dalla procedura.

Un altro vantaggio è legato al fatto che in ambito industriale, soprattutto nel caso in questione, molti schemi elettrici o meccanici hanno riferimenti ad altri schemi.

La ricerca digitale dei documenti referenziati è sicuramente molto più efficiente di quella tradizionale in termini di tempo.

L'interfaccia del document browser sviluppato, è stata pensata per includere tutte le funzionalità necessarie a soddisfare le necessità degli operatori senza renderla troppo complessa e pesante da visualizzare.

La documentazione

La documentazione da visualizzare è stata fornita principalmente in formato PDF. Unity non integra un sistema di visualizzazione PDF ma solo di immagini sotto forma di texture o sprite.

Per ovviare a questo problema, le singole pagine dei PDF devono essere convertite in immagini in modo da poter essere visualizzate all'interno di Unity e quindi dell'applicazione.

Una volta convertite, le pagine sono disposte a “libro”, una dietro l'altra in verticale leggermente sfasate l'una dall'altra.

Azioni sulla documentazione

I gesti sono il metodo principale di interazione con il document browser, sono stati utilizzati per sfogliare, scalare le pagine e interagire con i tasti dell'interfaccia.

Per sfogliare e scalare le pagine, è stato utilizzato il gesto chiamato *manipulation*.

A seconda della direzione e del verso del gesto, l'azione corrispondente cambia.

- **Scala:** un gesto di *manipulation* orizzontale, se effettuato verso destra, permette all'utente di aumentare la dimensione delle pagine, al contrario, verso sinistra consente di ridurla.
Sono stati posti dei limiti alla dimensione massima e minima raggiungibile delle pagine utili ad evitare situazioni critiche per l'utente.
- **Consultazione:** per sfogliare le pagine, inizialmente è stato predisposto un gesto di *manipulation* in profondità cioè muovendo la mano avanti e indietro rispetto all'utente.
Questa scelta è stata successivamente corretta con un gesto verticale in quanto molto più naturale e semplice da eseguire.
Una *manipulation* verticale verso il basso permette quindi di visualizzare la pagina successiva mentre, verso l'alto, consente di tornare alla pagina precedente.

La struttura del document browser è mostrata in figura 4.7:

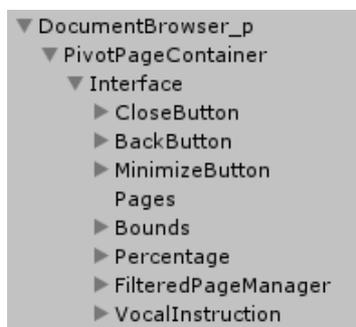


Figura 4.7: Gerarchia dei componenti del document browser

L'elemento *interface* rappresenta l'interfaccia vera e propria, ha cioè la funzione di contenere tutti i suoi elementi, tasti, pagine ecc.

L'oggetto *Pages* si occupa della gestione delle pagine per quanto riguarda l'interazione tramite i gesti.

Il meccanismo di consultazione prevede che la lista delle pagine venga gestita come un buffer circolare.

A seconda del verso del gesto, vengono invocate due funzioni differenti: *NextPage()* e *PrevPage()*.

Entrambe le funzioni si occupano di aggiornare l'indice della pagina corrente, aggiornare la posizione delle pagine nel buffer circolare ed eseguire l'animazione per effettuare il movimento vero e proprio.

Le animazioni sono gestite mediante due coroutine differenti: *PageMovement()* e *PageFade()*.

La prima si occupa di traslare le pagine in avanti e indietro mentre la seconda gestisce le animazioni di fade-in e fade-out delle pagine.

Per esempio se mi trovo alla prima pagina e scorro alla seconda, verrà eseguita un'animazione di fade-out per la prima pagina e un'animazione di fade-in per la seconda pagina, fino a quel momento non visibile, in modo da mostrare sempre cinque pagine.

Oltre al gesto di *manipulation* è stato utilizzato il gesto di *select* per interagire con i tasti dell'interfaccia.

L'interfaccia è molto semplice, è composta da tre pulsanti, numerati e mostrati in figura 4.8, relativi alle azioni principali che possono essere eseguite sulla documentazione ad eccezione del filtraggio dei documenti. Per quest'ultimo sono stati definiti dei comandi vocali perchè più comodi ed intuitivi.

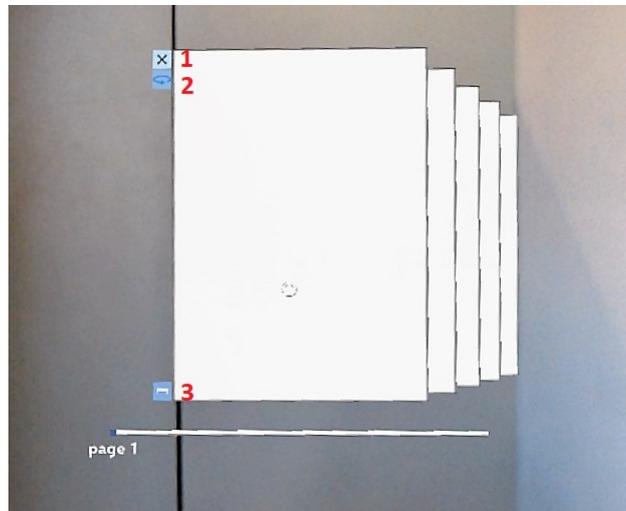


Figura 4.8: Interfaccia document browser

Il primo permette di chiudere la documentazione mantenendo la configurazione corrente in modo da riprendere dallo stesso punto successivamente.

Eventuali pagine duplicate e ancorate nello spazio verranno mantenute tali per gli utilizzi successivi.

Il tasto numero 2 consente invece di orientare la documentazione nella direzione della camera del dispositivo nel caso non lo fosse a seguito di spostamenti dell'utente. Può infatti accadere che l'operatore, una volta aperta la documentazione, si muova per effettuare determinate operazioni senza essere allineato con le pagine; questa funzione permette quindi in ogni momento di allineare la documentazione alla vista dell'utente.

Il terzo pulsante presente, permette di minimizzare la documentazione nel caso in cui l'utente necessiti di avere il campo di vista completamente libero per eseguire determinate operazioni e fare in modo che il dispositivo non sia mai motivo di disturbo.

Una volta minimizzata la documentazione, comparirà il rispettivo tasto per poterla ripristinare.

Questo, seguirà l'utente nei suoi movimenti in modo che in qualsiasi momento si possa ripristinare la documentazione senza dover obbligatoriamente ritornare nel punto esatto in cui era stata minimizzata.

Al ripristino della documentazione, essa sarà automaticamente orientata verso la camera del dispositivo e quindi con la direzione di vista dell'utente

Le pagine possono essere anche trattate singolarmente. Ad esempio, se l'operatore necessita di visualizzare più pagine contemporaneamente, può con un semplice gesto di *select* copiare una pagina e posizionarla a suo piacimento nello spazio come in figura 4.9.

Le singole pagine copiate, una volta posizionate possono essere chiuse oppure scalate.

L'ultimo componente presente nell'interfaccia della documentazione è una barra

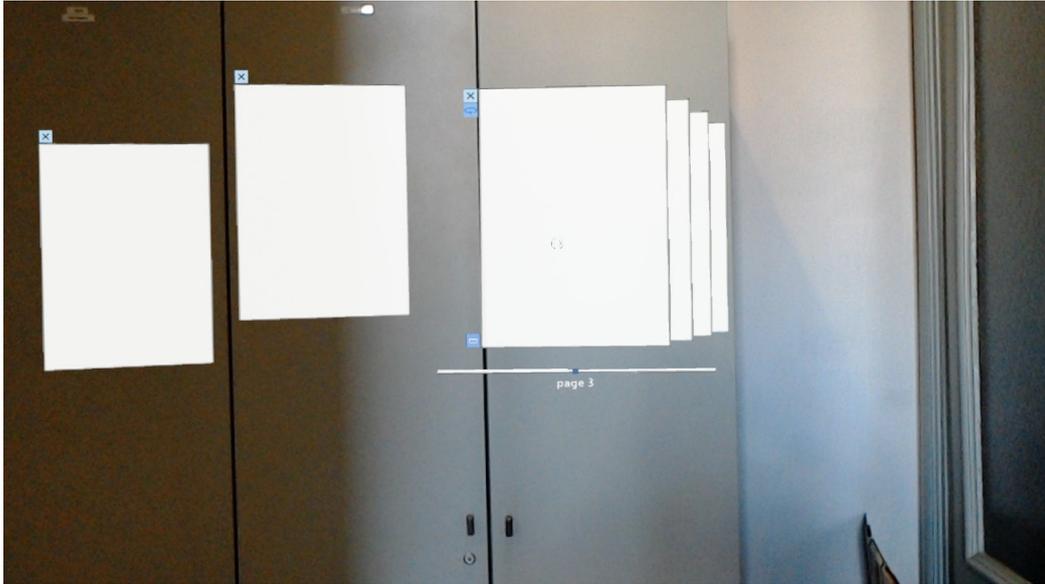


Figura 4.9: Più pagine mostrate contemporaneamente

avanzamento che mostra il nome della pagina corrente e la percentuale di completamento della documentazione molto utile come feedback visivo per l'utente per capire quale pagina sta visualizzando, utile particolarmente per sapere se si trova alla prima o all'ultima pagina non potendo quindi accedere rispettivamente alla pagina precedente o successiva.

Il filtro vocale

Oltre ai gesti, il secondo metodo per interagire con la documentazione sono i comandi vocali.

Come accennato in precedenza, sono stati definiti alcuni comandi vocali necessari a filtrare le pagine in base al nome.

Più in particolare i comandi da utilizzare sono tre: *find*, *go* e *close*.

- **Find:** questo comando permette di abilitare l'ascolto da parte dell'applicazione per registrare ciò che viene pronunciato dall'utente e filtrare così le pagine. Ci sono diversi feedback visivi in questa fase: il primo riguarda la scala della documentazione.

Quest'ultima viene infatti scalata riducendone la dimensione per evidenziare all'utente che si trova in una modalità differente da quella di consultazione.

Un secondo feedback visivo è la scritta "recording" che compare al centro della documentazione per informare l'utente che l'applicazione è pronta a registrare tutto ciò che viene pronunciato.

Viene in aggiunta rappresentato l'elenco dei comandi vocali disponibili in una particolare fase dell'operazione di filtraggio per guidare costantemente l'utente.

Una volta impartito il comando, l'utente può iniziare a pronunciare la/le parole da andare a ricercare all'interno dei nomi delle pagine.

Durante la fase di registrazione del messaggio l'applicazione mostra continuamente il messaggio elaborato fino a quel momento in modo da fornire all'utente un feedback visivo costante delle parole interpretate.

Dopo un periodo di silenzio di cinque secondi, termina la registrazione e viene mostrato il messaggio registrato.

- **Go:** se il messaggio registrato è stato interpretato in modo errato, si può procedere pronunciando nuovamente il comando *find* per iniziare una nuova registrazione.

Nel caso in cui invece l'utente sia soddisfatto del messaggio registrato e vuole procedere alla ricerca, pronunciando il comando *go* verranno istantaneamente mostrate tutte le pagine che contengono nel nome la stringa registrata.

Lato software, vengono selezionate tutte le pagine contenenti la stringa registrata e copiate in un nuovo buffer circolare temporaneo che viene sostituito a quello contenente tutte le pagine, come se si sostituisse un cassetto contenente una documentazione con un secondo cassetto contenente solo un sottoinsieme del contenuto del primo.

L'interfaccia si presenta dunque come quella classica con l'aggiunta di una piccola GUI posta sotto le pagine e contenente due tasti per poter scorrere in avanti o indietro tra le pagine filtrate e una casella di testo raffigurante il numero di pagine filtrate.

- **Close:** è l'ultimo comando disponibile nella fase di filtraggio. Quando viene pronunciato, l'applicazione torna alla visualizzazione della documentazione intera riprendendo dalla pagina a cui la si era lasciata.

In figura 4.10 è mostrata la documentazione durante le varie fasi di filtraggio delle pagine.

I comandi vocali sono stati predefiniti per mezzo di uno script chiamato *SpeechManager*.

Tramite questo script, vengono aggiunte ad una lista le parole chiave da riconoscere corrispondenti ai comandi precedentemente spiegati.

Successivamente vengono registrate le funzioni di callback da invocare al riconoscimento di un determinato comando.

In generale il componente *document browser* può essere riutilizzato sia in ambito industriale che in tutti gli ambiti in cui serve visualizzare ed interagire con la documentazione digitale in realtà aumentata.

Le varie caratteristiche approfondite possono infatti essere facilmente modificate e riadattate a casi specifici.

I comandi vocali possono essere facilmente sostituiti da pulsanti e gesti nel caso in cui a causa di condizioni ambientali particolari non fosse possibile utilizzare la voce dell'utente per impartire comandi.

Viceversa, tutte le azioni eseguite mediante comandi gestuali possono essere convertite in comandi vocali a patto che questi, d'accordo con le specifiche del dispositivo utilizzato, non siano complicati, eccessivamente lunghi o simili tra loro.

4.5.3 Comunicazione Client - Server

Per la comunicazione client-server è stata utilizzata la libreria C++ *RakNet* che permette il trasporto di pacchetti UDP e TCP.

Dato che *Unity* non supporta classi native C++, per poter integrare *RakNet* al suo interno e sfruttarne le funzionalità, è stato generato un wrapper C#.

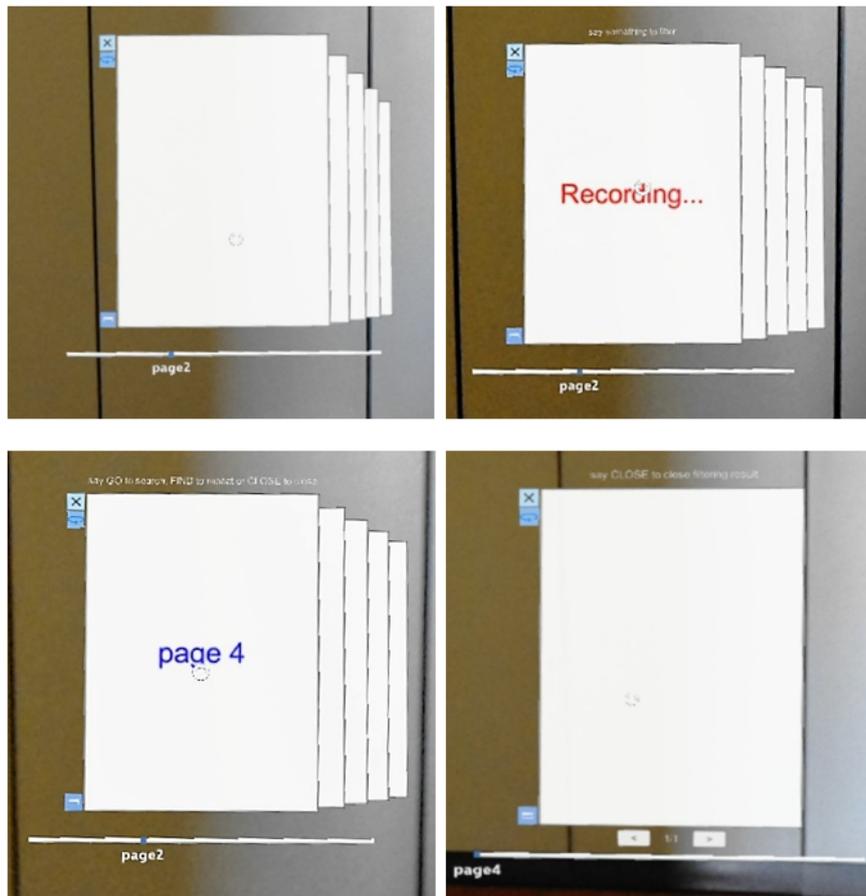


Figura 4.10: Le diverse fasi del filtro delle pagine

La comunicazione tra il client e il server avviene mediante uno scambio di pacchetti predefiniti. Il primo byte di ogni pacchetto indica il tipo di messaggio contenuto nel payload.

L'applicazione AR contatta il server in tre situazioni principali: gestione dei file di configurazione nella fase iniziale di setup, gestione dei vari moduli negli avvisi successivi e gestione della documentazione.

Per far questo, sono stati definiti dei pacchetti personalizzati a seconda del tipo di richiesta o risposta necessaria.

- Setup iniziale:** durante questa fase, una volta selezionato un modulo da posizionare, viene creato un nuovo oggetto corrispondente alla *room* selezionata. Questa viene poi configurata e popolata con gli oggetti di supporto virtuali in base ai dati contenuti nel file di configurazione relativo alla *room*. Per ottenere questo file, l'applicazione AR invia un messaggio al server di tipo *CONFIG_REQUEST* contenente il nome del modulo da posizionare. Il server risponde con un messaggio *CONFIG_FILE* contenente nel payload i byte del file di configurazione richiesto. Questi vengono correttamente interpretati dal client che configura e posiziona i vari oggetti virtuali all'interno della *room*.
- Avvisi successivi:** ad ogni avvio, l'applicazione deve caricare e posizionare tutti i moduli che erano stati ancorati in precedenza. Per far questo all'avvio,

si connette al server e, come schematizzato in figura 4.11, dopo uno scambio preliminare di messaggi relativi alla connessione, invia un messaggio di *SCENE_CONFIG* per ricevere un file di configurazione contenente tutti i moduli ancorati nelle sessioni precedenti.

A questa richiesta, il server risponde inviando il file nel payload di un messaggio di tipo *CONFIG_FILE* che, come nella situazione precedente viene elaborato dal client.

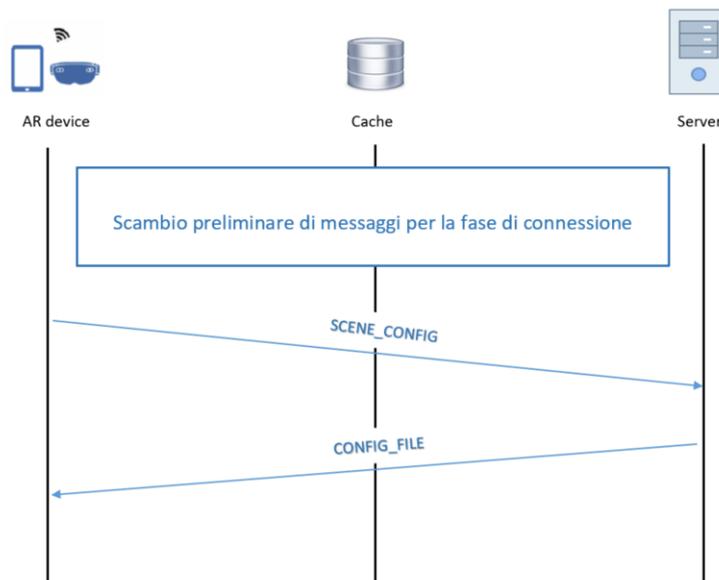


Figura 4.11: Scambio di messaggi client-server all'avvio dell'applicazione

- Gestione documentazione:** le varie *room* possono contenere diversi document browser; l'utente può interagire con uno solo di questi componenti alla volta per evitare che venga ostruito eccessivamente il campo di vista. Nella gerarchia di cartelle dell'applicazione, è presente una cartella specifica per ogni *room* contenente una sezione dedicata alla documentazione in cui sono presenti diverse sottocartelle relative ognuna ad una documentazione diversa. Il file di configurazione dei vari componenti di una *room*, contiene un proprietà relativa al nome di ogni document browser. Il nome corrisponde a quello della cartella presente sul server contenente le immagini da mostrare. Quando l'utente seleziona un document browser tramite input gestuali, il nome del componente viene combinato con il nome della *room* corrispondente e utilizzato per richiedere al server una lista dei file presenti nel percorso specificato come mostrato in figura 4.12. Il percorso relativo viene inserito in un messaggio di tipo *DIR_INFO* ed inviato al server che risponde con un messaggio *DIR_CONTENT* contenente la lista dei file eventualmente presenti nel percorso specificato. Il client, ovvero l'applicazione AR, controlla se i file sono presenti in cache perchè utilizzati in precedenza. Nel caso non siano presenti in cache, invia per ogni file mancante una richiesta

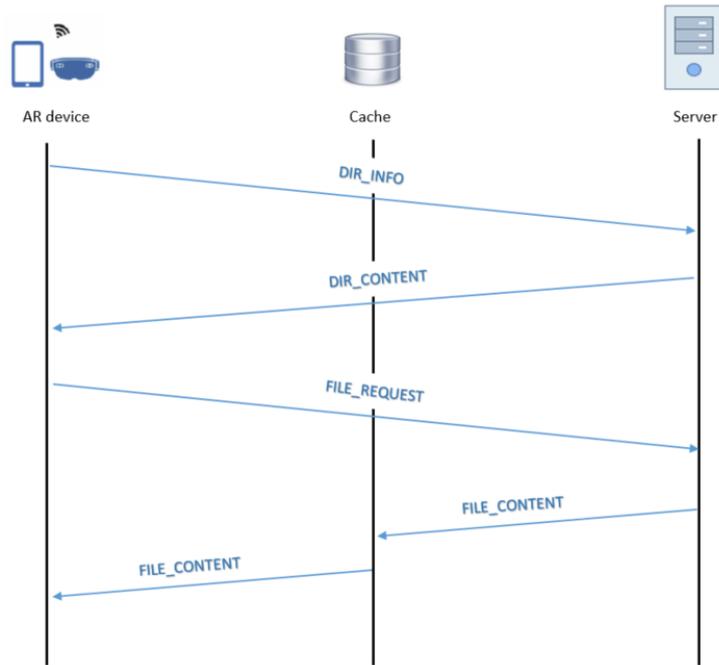


Figura 4.12: Comunicazione client-server relativa alla documentazione

al server con un messaggio di tipo *FILE_REQUEST* per ottenerli. Un'eventuale secondo utilizzo del document browser richiamerebbe i file presenti in cache evitando di dover ottenerli nuovamente dal server.

In figura 4.13 sono rappresentate le strutture dei pacchetti scambiati da client e server. Come si può notare, la maggior parte dei pacchetti di rete scambiati sono composti semplicemente da un *msg_id* per differenziarli l'uno dall'altro e dal *payload* contenente i byte dei file di risposta o il testo del messaggio.

Per quanto riguarda i pacchetti di tipo *FILE_REQUEST* e *FILE_CONTENT*, viene aggiunto un ulteriore campo chiamato *ord_n* e contenente la numerazione dei pacchetti.

Questa caratteristica aggiuntiva è utile ad associare la richiesta di un file con la rispettiva risposta nel caso in cui il client debba effettuare richieste multiple per ottenere più file, ad esempio mancanti in cache.

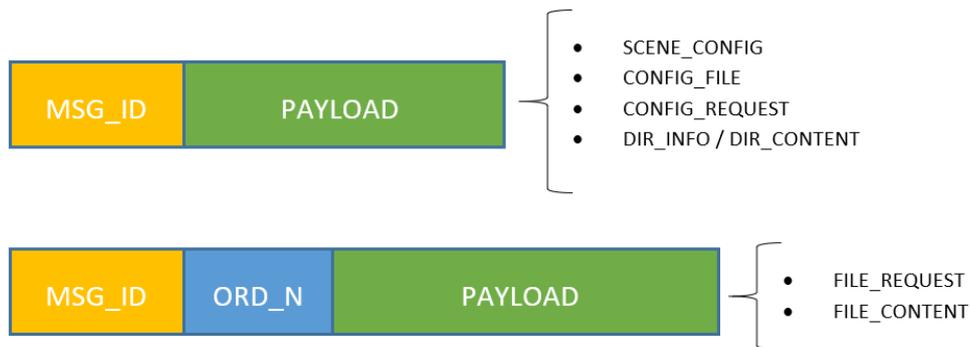


Figura 4.13: Struttura dei pacchetti di rete scambiati

4.5.4 Checklist

La checklist è il secondo oggetto funzionale utile all'operatore nelle procedure di manutenzione o calibrazione in cui, oltre a dover consultare la documentazione, deve effettuare una serie di operazioni in un determinato ordine.

I due componenti possono essere mostrati quindi contemporaneamente in modo che l'utente possa tener traccia delle operazioni portate a termine nel caso in cui dovesse interrompere la procedura e riprenderla in un secondo momento.

L'interfaccia di questo componente è molto semplice, come mostrato in figura 4.14 ed include funzionalità già presenti nel document browser come il tasto di chiusura e per orientare il componente nel verso del dispositivo.

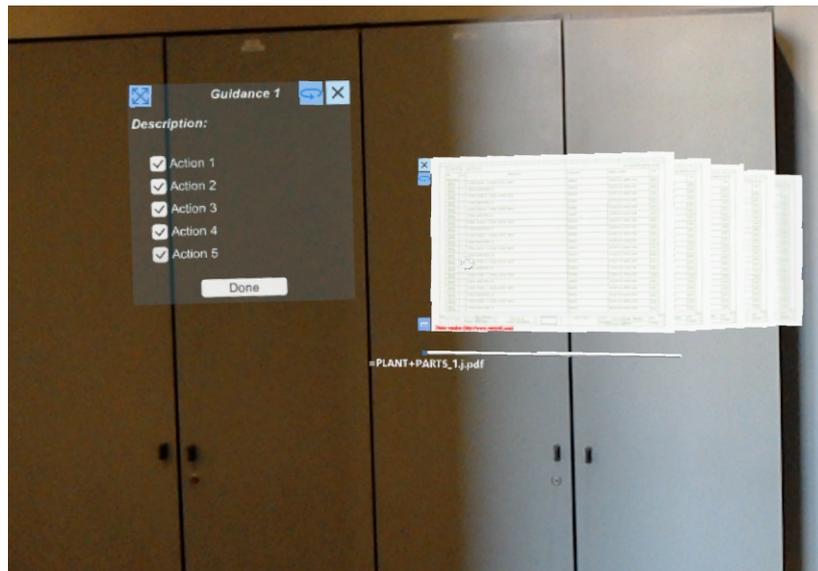


Figura 4.14: Interfaccia checklist

La checklist può inoltre essere spostata così come avviene per le singole pagine duplicate della documentazione.

Una caratteristica aggiuntiva è rappresentata dal tasto *done* che non può essere premuto finché tutte le azioni sulla lista non sono state completate o meglio, segnate come tali.

Questo tipo di meccanismo, mostrato in figura 4.15 non assicura in nessun modo che le azioni segnate siano state effettivamente eseguite ma vuole essere uno strumento di promemoria per tenere esclusivamente traccia dell'ultima azione completata relativa alla procedura.

Figura 4.15: Tasto *done* abilitato

4.5.5 Pannello informativo

Questo componente può essere associato sia a una singola stanza che ad un componente interno ad essa.

Ci sono casi in cui infatti un modulo della linea di produzione è composto da più sotto-moduli talvolta mobili; in questi casi ogni sotto-modulo è caratterizzato da un proprio pannello informativo che mostra il nome o altre informazioni relative al componente.

Il pannello informativo riferito ad una stanza invece, indica le informazioni relative alla stanza come nome, funzione e sotto-moduli presenti in essa.

In generale questo tipo di componente può mostrare sia testi che immagini. Un caso particolare di pannello informativo sono infatti le immagini di riferimento.

Queste immagini vengono utilizzate in determinati casi per effettuare confronti tra la configurazione corrente di un particolare componente e quella corretta.

Insieme a document browser e checklist, è quindi un componente di supporto per le operazioni di controllo e calibrazione dei parametri operativi.

Alcuni moduli come per esempio armadi elettrici contenenti banchi di PLC, essendo composti da migliaia di led, richiedono molto tempo per essere controllati.

I led infatti devono trovarsi in una ben precisa configurazione in modo che l'intera linea di produzione possa funzionare correttamente e, gli operatori, dovendo confrontare i componenti in questione con immagini di riferimento e schemi cartacei, spesso faticano ad individuare quali si trovano in stato di errore.

Questo particolare oggetto funzionale sostituisce gli schemi cartacei con immagini di riferimento digitali da sovrapporre ai componenti reali.

La sovrapposizione di tali immagini, permette infatti di individuare a colpo d'occhio eventuali configurazioni errate senza eccessive perdite di tempo.

La sovrapposizione di queste immagini ad oggetti del mondo reale rappresenta però una criticità legata sia alla qualità delle immagini che al loro valore di trasparenza.

Per poter portare beneficio, le immagini di confronto devono essere ad alta qualità e prive di distorsioni, spesso presenti, dovute ai dispositivi di cattura utilizzati.

Sicuramente, a differenza del document browser, la qualità non rappresenta un collo

di bottiglia. Qui infatti viene rappresentata una sola immagine per volta a differenza del document browser dove possono essere mostrate più pagine contemporaneamente con la possibilità di duplicarle più volte.

Un altro valore critico è quello relativo alla trasparenza delle immagini da sovrapporre.

Immagini troppo opache infatti, una volta sovrapposte ai componenti da controllare li occluderebbero completamente rendendo le operazioni di confronto impossibili.

Al contrario, immagini con un valore di trasparenza vicino allo zero sarebbero impossibili da interpretare.

In fase di test sono stati valutati diversi gradi di trasparenza cercando di riprodurre i casi d'uso reali.

È stato notato come sia molto difficile trovare un livello di trasparenza tale da permettere un confronto agevole di componenti che non emettono luce.

Come accennato precedentemente però, i casi d'uso reali prevedono principalmente l'analisi di componenti di tipo led, che, emettendo luce sono più facilmente visibili di altri oggetti anche con immagini sovrapposte.

4.5.6 Menù

I menù di qualsiasi tipo di applicazione sono uno dei componenti più importanti con cui l'utente interagisce.

Per rendere l'esperienza il più reale e piacevole possibile, è fortemente sconsigliato creare menù di tipo *head-lock* cioè posizionati di fronte all'utente e legati al movimento della testa.

In generale, questi tipi di contenuti risultano essere scomodi per gli utenti in quanto, essendo posizionati nell'*attached frame of reference*, sarebbero infatti costantemente davanti agli occhi dell'utente occludendone il campo di vista anche durante i movimenti a differenza dei contenuti *body-locked*.

Questi infatti, sono meno intrusivi in quanto possono essere posizionati lateralmente rispetto al campo di vista dell'utente in modo da non essere causa di disturbo.

I vari menù creati per l'applicazione sono ancorati nello spazio oppure di tipo *body-locked*.

Sono presenti due menù: quello principale e quello relativo alla gestione della posizione delle varie *room*.

Il menù principale presenta due opzioni, una per gestire il posizionamento dei moduli e una per monitorarli nel caso fossero già posizionati.

Questo tipo di menù non è fisso nello spazio ma segue i movimenti dell'utente in modo che possa essere accessibile in ogni momento e da qualsiasi posizione.

Durante il monitoraggio dei vari moduli posizionati, è possibile richiamare questo menù con il comando vocale *setup menù* che lo farà apparire di fronte all'utente.

Tramite l'opzione *room configuration*, è possibile accedere ad un secondo menù utile per gestire il posizionamento dei moduli.

Per prima cosa, tramite un elenco a tendina, l'utente sceglie quale modulo andare a configurare.

A seconda della stanza selezionata vengono mostrate diverse opzioni: una per posizionare il modulo selezionato attivando il meccanismo di riconoscimento del marker e una per effettuare un reset della posizione nel caso in cui non sia stata ancorata correttamente nello spazio.

Dopo aver selezionato una stanza specifica, viene creata un'istanza di un oggetto di tipo *room*. Questo è caratterizzato da una configurazione base comune a tutte le *room*.

Una volta posizionato il modulo grazie all'aiuto del modello guida, utile ad allineare correttamente contenuti virtuali e oggetti reali, esso verrà popolato dei vari oggetti di supporto virtuali previsti.

La configurazione di tali elementi riguarda la loro posizione all'interno della stanza; tutte le informazioni vengono reperite dal file di configurazione ricevuto dal server.

Capitolo 5

Risultati

5.1 Test in fase di progettazione

Durante la progettazione dell'applicazione sono stati effettuati diversi test riguardanti vari aspetti, sia legati al dispositivo utilizzato che agli strumenti di sviluppo. Questi test sono stati utili per risolvere i vari problemi riscontrati in fase di progettazione e garantire così prestazioni elevate e un'esperienza utente migliore.

5.1.1 Criticità del dispositivo

In fase di progettazione sono stati eseguiti esperimenti con oggetti e stanze degli uffici aziendali.

I test hanno evidenziato una criticità nel posizionamento delle *room* legata al dispositivo impiegato.

Questa è relativa alla perdita temporanea del tracking durante il passaggio da una stanza ben illuminata ad una con scarsa illuminazione e nasce dal fatto che il dispositivo, pur conoscendo gli ambienti in cui sono stati effettuati i test, è predisposto per funzionare ottimamente in spazi ampi e ben illuminati poiché più facili da mappare.

È stato però riscontrato che la perdita dell'orientamento è solo temporanea in quanto, arrivato nella nuova stanza, il dispositivo recupera dopo pochi secondi l'orientamento visualizzando correttamente eventuali ologrammi ancorati nello spazio.

Sicuramente un'accurata mappatura degli ambienti in cui viene utilizzata l'applicazione, limita o elimina del tutto la perdita dell'orientamento.

5.1.2 Problemi legati ai componenti usati

Il primo problema che si è verificato, è legato all'utilizzo di Vuforia per il riconoscimento del marker utilizzato per posizionare le varie *room*. A causa infatti di una precisione non ottima del tracciamento del marker da parte di Vuforia, della qualità del marker e delle condizioni di illuminazione, non sempre ottime, a volte il posizionamento di una *room* non avveniva con estrema precisione. Gli errori riguardavano sia la posizione che la rotazione del modello virtuale.

Per rilevare errori anche minimi nel posizionamento, in fase di test è stato configurato un oggetto piano virtuale delle dimensioni del marker, da visualizzare esattamente sovrapposto al marker una volta che quest'ultimo viene riconosciuto.

Per correggere gli errori rilevati, sono stati definiti degli offset di posizione da applicare agli oggetti una volta ancorati e delle correzioni riguardanti la rotazione dei modelli.

In figura 5.1 è mostrato il posizionamento di un modulo in fase di test in azienda, come si può vedere il posizionamento è sfasato di circa 3-4 cm a causa delle scarse condizioni di illuminazione della stanza.



Figura 5.1: Errore nel posizionamento di un modulo in fase di test

Un secondo problema è legato al componente per poter visualizzare le immagini. Unity mette infatti a disposizione diverse primitive per la visualizzazione di immagini: *raw image* e *image*.

Sono state effettuate diverse prove, legate alle prestazioni, per scegliere accuratamente il migliore tra i vari elementi forniti da Unity.

Inizialmente, sono stati utilizzati oggetti di tipo *image* che supportano unicamente la visualizzazione di immagini di tipo sprite per poi passare ad oggetti di tipo *raw image* che permettono anche la visualizzazione di immagini in formato texture.

La differenza tra le due sta nel fatto che le texture, essendo componenti statici, vengono utilizzate per cambiare l'apparenza di un oggetto aggiungendo dettagli e colori.

Le sprite invece, essendo elementi dinamici, possono essere modificate, create o distrutte durante l'esecuzione dell'applicazione; queste caratteristiche le rendono però componenti sicuramente più complessi e pesanti da visualizzare da parte del dispositivo.

Eseguendo vari test sulle prestazioni è stato evidenziato una diminuzione del frame rate durante la visualizzazione di più immagini tramite il componente *image*.

In particolare, utilizzando componenti di tipo *raw image*, il frame rate varia dai 55 ai 60 fps come mostrato in figura 5.2 a sinistra della documentazione.



Figura 5.2: Frame rate con componente *raw image*

Utilizzando invece componenti di tipo *image*, il frame rate cala fino a circa 28-30 fps, figura 5.3 a sinistra della documentazione.

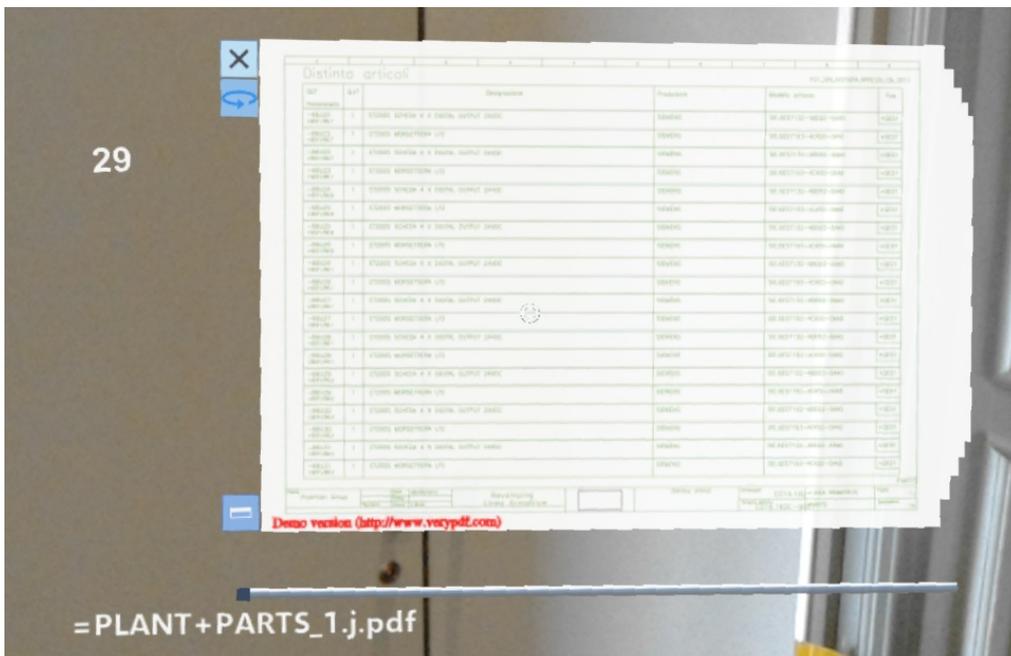


Figura 5.3: Frame rate con componente *image*

Questo calo di prestazioni non si è verificato invece nel caso di visualizzazione tramite *raw image*.

Stabilito il componente da utilizzare per le immagini, è stata scelta la disposizione della documentazione. L'interfaccia permette di visualizzare cinque pagine alla volta in modo da non appesantire l'esperienza dell'utente.

Il numero di pagine visualizzabili è un parametro configurabile per fare sì che si

possa personalizzare l'esperienza in base alle esigenze.

In seguito sono stati effettuati altri test per trovare posizione e scala adatti ad una comoda visualizzazione.

Dopo aver visualizzato le pagine a distanze diverse è stata raggiunta la conclusione che una distanza di poco meno di due metri è un valore adatto per una corretta visualizzazione.

5.2 Test soggettivi

L'applicazione è stata fatta provare ad un gruppo di 13 utenti di età compresa tra i 27 e i 51 anni.

Tra i soggetti sono presenti portatori di occhiali, utili per valutare il grado di comodità del dispositivo utilizzato contemporaneamente ad occhiali da vista.

Gli utenti che hanno preso parte ai test hanno diverse competenze, sia in ambito ICT che in quello industriale.

In seguito all'utilizzo sul campo dell'applicazione e delle sue funzionalità, è stato chiesto agli utenti di compilare un questionario[17] per valutare la qualità dell'esperienza.

Sono stati valutati parametri legati sia all'applicazione che al dispositivo utilizzato. Come mostrato dai grafici in figura 5.4, anche se non tutti gli utenti avevano indossato precedentemente HoloLens, sono stati riscontrati pareri positivi sulla facilità di indossarlo.

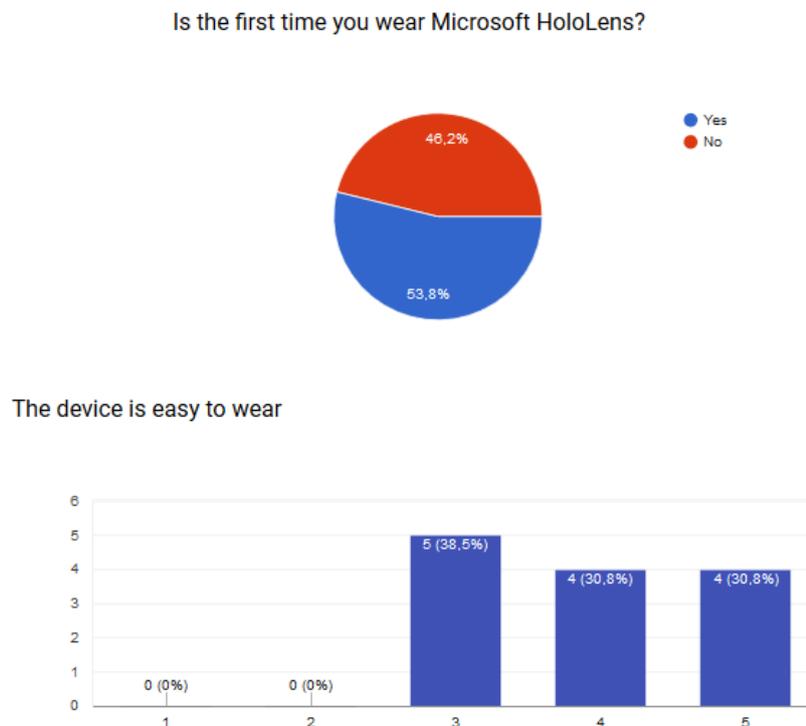


Figura 5.4: Grafico valutazioni hardware

Nel grafico sull'asse delle ascisse sono riportati i valori riferiti al grado di facilità con

cui gli utenti hanno indossato il dispositivo; 1 indica molto difficile e 5 molto facile. Pareri più negativi, come si può vedere in figura 5.5 sono stati riscontrati per quanto riguarda il campo di vista del dispositivo che, come analizzato nei capitoli precedenti, è il limite maggiore di HoloLens in quanto decisamente piccolo.

Il grafico riporta sull'asse delle ascisse gli utenti che hanno risposto al questionario mentre, sull'asse delle ordinate, sono riportati i punteggi degli utenti alle domande; 1 rappresenta la valutazione minima e 5 indica il massimo.

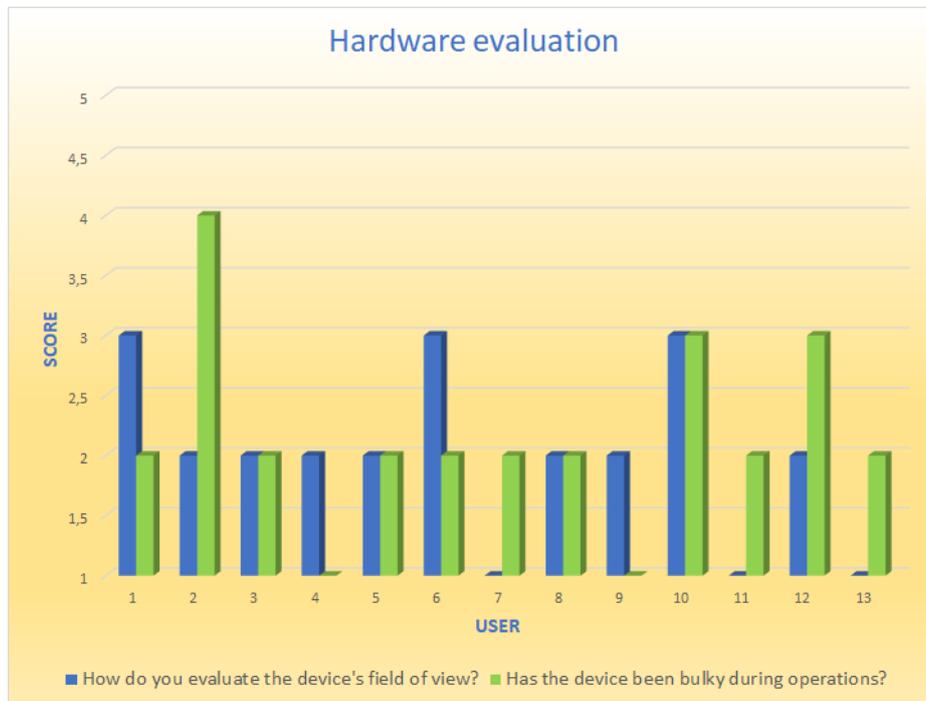


Figura 5.5: Caratteristiche del dispositivo

Per quanto riguarda il disturbo provocato dal dispositivo indossato durante le varie operazioni effettuate, la quasi totalità dei tester, come mostrato dal grafico in figura 5.5 ritiene che il dispositivo non sia ingombrante.

I pareri riguardanti l'applicazione sono in prevalenza positivi. Il grafico in figura 5.6 riporta, sull'asse delle ordinate, i pareri relativi alle caratteristiche più generali dell'applicazione come: la facilità di utilizzo, la praticità ecc.

Nel grafico, per le prime tre caratteristiche: *App easiness*, *App enjoyment* e *App practicality*, 1 è il minimo e 5 il massimo mentre per la quarta caratteristica: *Placement difficulty*, riferita alla difficoltà del posizionamento dei vari moduli, 1 indica "molto semplice" mentre 5 equivale a "molto difficile".

Per quanto riguarda invece l'interazione dell'utente e l'interfaccia, i dati sono riportati in figura 5.7.

Nel grafico, i punteggi riportati sull'asse delle ordinate indicano le valutazioni degli utenti alle varie affermazioni dove 1 è il minimo e 5 il massimo.

In fase di test è stato riprodotto il rumore presente in un ambiente industriale mediante una fonte artificiale mentre le prove sul campo sono state effettuate con il sistema di produzione in funzione.

In particolare, i comandi vocali sono risultati semplici da ricordare così come i gesti e non hanno rappresentato nessun problema dovuto al rumore di sottofondo dell'ambiente industriale.

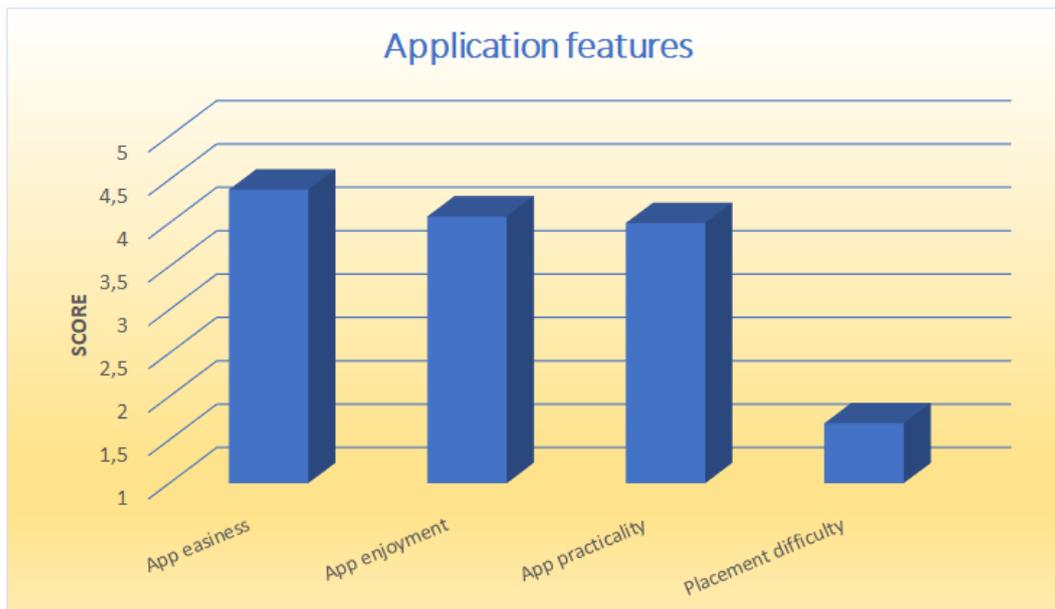


Figura 5.6: Caratteristiche generali dell'applicazione

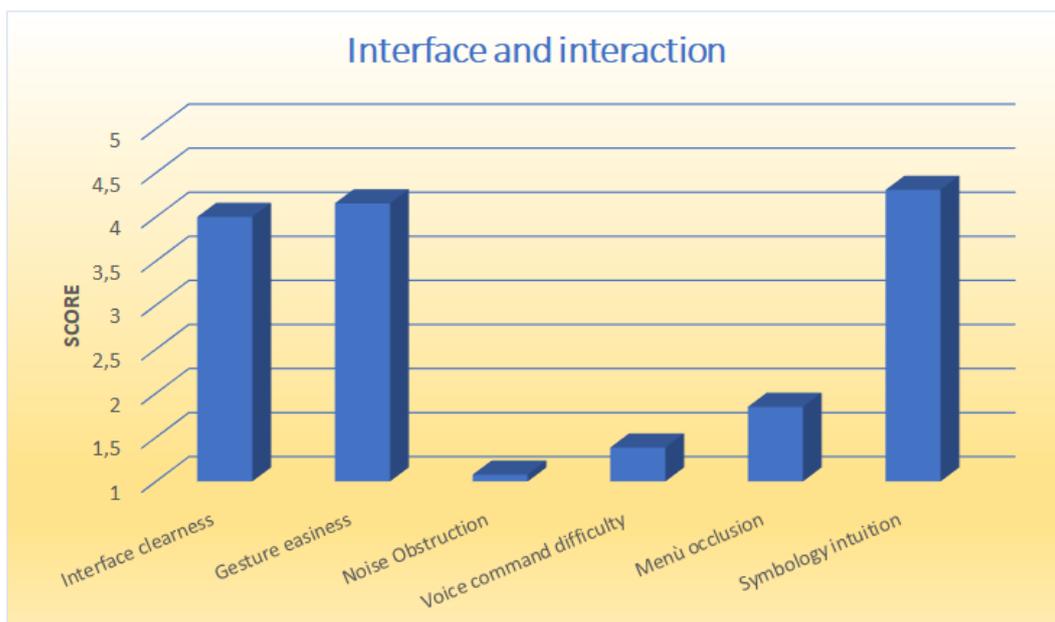


Figura 5.7: Valutazioni dell'interazione e dell'interfaccia

Questi due risultati sono molto importanti in quanto testimoniano come la scelta di utilizzare comandi vocali brevi abbia superato l'ostacolo dovuto all'ambiente rumoroso.

In generale gli utenti hanno espresso pareri decisamente positivi riguardo alla possibilità di avere le mani libere durante le operazioni effettuate e all'utilità dei componenti virtuali sviluppati per il supporto alle varie procedure.

Tra i risultati ottenuti, mostrati in figura 5.8, sicuramente uno dei più significativi è legato alla sostituzione dei metodi tradizionali con la realtà aumentata per effettuare manutenzione e riparazione.

Anche in questo caso, le valutazioni riportate sull'asse delle ordinate, sono caratterizzate da un minimo pari ad 1 ed un massimo pari a 5.

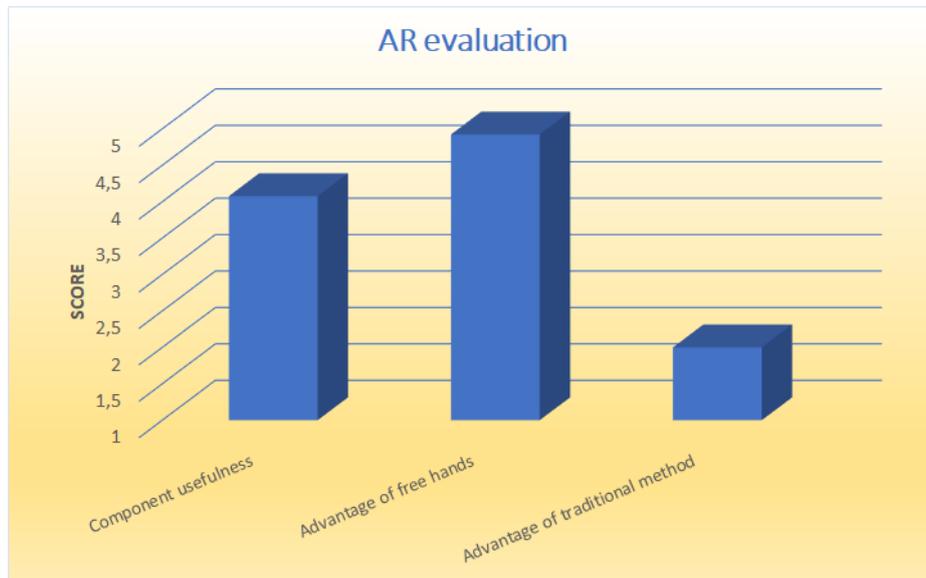


Figura 5.8: Utilità AR

Capitolo 6

Conclusioni

È stato presentato un progetto riguardante un'applicazione di realtà aumentata per la supervisione del processo industriale.

Gli obiettivi principali dell'applicazione sono quelli di aumentare l'efficienza del processo industriale, migliorare le procedure di manutenzione e velocizzare le operazioni di riparazione e ricerca dei guasti.

In generale i risultati ottenuti sono soddisfacenti anche come dimostrato dai test effettuati.

Sicuramente sviluppi futuri permetteranno di migliorare l'applicazione cercando di eliminare i limiti presenti.

Uno di questi riguarda infatti lo spazio occupato dalle varie immagini relative alle documentazioni.

Al momento, quando l'utente necessita di una particolare documentazione, la ottiene a seguito della comunicazione tra il client e il server remoto per ottenere e salvare in cache tutti i file non ancora presenti.

Essendo però limitato lo spazio di archiviazione disponibile su HoloLens, l'applicazione dispone di una cache molto limitata che costringe quindi ad una continua comunicazione con il server.

Si dovrà quindi ottimizzare lo spazio occupato in cache dalle varie immagini senza ridurne la qualità. Un altro limite è infatti legato a quest'ultima.

Sebbene le immagini relative alla documentazione siano ad alta qualità, 2048px di larghezza, la visualizzazione con il dispositivo non è ancora ottima soprattutto a seguito di un ingrandimento delle pagine.

Sempre riguardo alle immagini, in futuro verrà integrata sul server una funzionalità per convertire a *runtime* le varie pagine di un PDF in singole immagini.

Ad oggi infatti questo processo viene effettuato offline. L'integrazione di tale funzionalità permetterebbe di convertire eventuali nuovi PDF caricati sul server.

Sviluppi futuri riguardano la possibilità di definire comandi vocali anche per le azioni che ora vengono effettuate con comandi gestuali.

I vari test effettuati, hanno infatti evidenziato come il rumore di sottofondo presente nello stabilimento industriale non ostruisca i comandi vocali impartiti dall'utente.

Ovviamente i nuovi comandi vocali definiti non andranno a sostituire quelli gestuali già presenti ma, saranno una loro alternativa.

Un'altra funzionalità aggiuntiva futura riguarda la possibilità di scorrere più velocemente le pagine magari trascinando il cursore di livello sulla barra orizzontale, presente nell'interfaccia, rappresentante la percentuale di completamento.

Molte documentazioni infatti, sono composte da centinaia di pagine ed ovviamente scorrerle una per una è impensabile.

Sicuramente però il filtro vocale già presente permette di saltare ad una specifica pagina cercata senza per forza doverle scorrere tutte fino a trovarla.

Ovviamente uno dei miglioramenti più importanti riguarda l'hardware.

Come infatti emerso dai test, il campo di vista di HoloLens è molto ridotto e non permette una visuale agevole in ogni situazione.

I risultati ottenuti, descritti nel capitolo precedente, evidenziano come la realtà aumentata in ambito industriale, così come anche in altri ambiti, rappresenta sicuramente un avanzamento tecnologico rilevante.

In questo ambito la realtà aumentata può infatti esprimere tutto il suo potenziale tecnologico.

Sebbene ad oggi siano stati raggiunti ottimi risultati, investendo in tempo e risorse, in generale ci sono ancora molti aspetti da migliorare per quanto riguarda i dispositivi di realtà aumentata.

Molti di questi infatti sono caratterizzati da un campo visivo limitato che rappresenta un vincolo per le operazioni che devono essere svolte dagli utenti.

Devono sicuramente essere introdotte migliorie legate alla stabilità dei contenuti virtuali, al loro contrasto e alla loro risoluzione e alla potenza di calcolo dei dispositivi.

I dispositivi indossabili non cablati infatti devono avere dimensioni limitate, peso contenuto e integrando CPU, HPU, GPU, RAM e spazio di archiviazione, non possono ottenere le stesse prestazioni dei dispositivi cablati anche se questi ultimi rappresentano un vincolo di movimento per l'utente.

I dispositivi di tipo *hand-held* invece, come emerso dagli approfondimenti effettuati, risultano un ostacolo rilevante in quanto non permettono di avere le mani libere.

È comunque evidente che i benefici apportati dalla realtà aumentata superano di gran lunga le criticità emerse legate all'ambiente per il quale si sviluppano le varie applicazioni.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare tutti coloro che sono stati al mio fianco durante tutto il percorso formativo.

Ringrazio i miei relatori Prof. Andrea Sanna e Prof. Fabrizio Lamberti per avermi dato la possibilità di svolgere questo progetto in collaborazione con Illogic S.r.l.

Ringrazio in particolare il Prof. Sanna per la costante presenza durante tutto il mio percorso di tesi, per il suo prezioso aiuto nella stesura di questo documento e per aver sempre risposto con sollecitudine alle mie domande.

Un grazie a Giuseppe Donvito, direttore tecnico di Illogic, per avermi permesso di approfondire le conoscenze nell'ambito della realtà aumentata e non solo, per avermi guidato durante tutto il percorso di tirocinio e per essere sempre stato disponibile quando necessario.

Ringrazio inoltre tutte le persone conosciute in Illogic durante lo svolgimento del progetto. In particolare, ringrazio i miei colleghi Andrea C., Andrea P., Dario e Lorenzo per avermi sempre assistito durante il tirocinio e per tutti i bei momenti passati insieme.

Grazie a tutti i colleghi di università per il lungo percorso affrontato insieme e per ogni momento di studio e divertimento trascorso con loro.

Ringrazio tutti gli amici della mia città Casale Monferrato e le persone conosciute a Torino in questi anni.

Per ultimo, il ringraziamento più importante, quello alla mia famiglia. Senza il sostegno dei miei genitori, il mio percorso universitario e la mia permanenza a Torino non sarebbero stato possibili. Spero di poterli rendere orgogliosi e ripagarli, in minima parte, con i risultati ottenuti.

Ringrazio mia sorella Emanuela e il suo compagno Alessandro per avermi supportato e consigliato durante i miei anni di studio.

Bibliografia

- [1] T. Caudell e D. Mizell. “Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes”. In: (1992). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/183317/>.
- [2] R. Azuma. “A survey of augmented reality”. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* (1997). URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2871077>.
- [3] S. Feiner, B. MacIntyre e D. Seligmann. “Annotating the real world with knowledge-based graphics on a see-through head-mounted display”. In: (1992).
- [4] S. Feiner, B. MacIntyre e D. Seligmann. “Knowledge-based augmented reality”. In: (1993). URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=159587>.
- [5] R. Whitaker et al. “Object Calibration for Augmented Reality”. In: (1995).
- [6] W. Friedrich. “ARVIKA-augmented reality for development, production and service”. In: *Mixed and Augmented Reality, 2002. ISMAR 2002. Proceedings. International Symposium on* (2002).
- [7] A. Raczynski e P. Gussmann. “Services and training through augmented reality”. In: (2004).
- [8] “Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications”. In: (). URL: <http://www.artesas.de>.
- [9] F. De Crescenzo et al. “Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support”. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* (2010). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5675633/>.
- [10] J. Saaski et al. “Augmented Reality Efficiency in Manufacturing Industry: A Case Study”. In: (2008). URL: https://www.designsociety.org/publication/27359/augmented_reality_efficiency_in_manufacturing_industry_a_case_study.
- [11] J. Henderson e S. Feiner. “Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret”. In: (2009). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5336486/>.
- [12] A. Oduor e S. Markon. “The use of augmented reality in the maintenance of mechanical objects”. In: (mag. 2017). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7988565/>.
- [13] N. Zenati, N. Zerhouni e K. Achor. “Assistance to maintenance in industrial process using an augmented reality system”. In: (2004). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7988565/>.

- [14] D. Aschenbrenner, M. Latoschik e K. Schilling. “Industrial Maintenance with Augmented Reality: Two Case Studies”. In: (2016). URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2996305&dl=ACM&coll=DL&CFID=822984697&CFTOKEN=42905687>.
- [15] S. Aromaa et al. “Use of Wearable and Augmented Reality Technologies in Industrial Maintenance Work”. In: (2017). URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2994321>.
- [16] N. Zenati et al. “Augmented reality system based on hand gestures for remote maintenance”. In: (2014). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6911258/>.
- [17] F. Ariotti e A. Sanna. “Evaluation of AR user experience”. In: (2017). URL: <https://goo.gl/forms/1B0w1EZHK51PRwkm1>.