

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

**La Realtà Aumentata come strumento
per la manutenzione industriale assistita**

Relatore

Prof. Andrea SANNA

Candidato

Martina SIRNA

Aprile 2022

Ringraziamenti

Indice

Elenco delle figure	VI
Acronimi	IX
1 Introduzione	1
2 L'industria 4.0 e la realtà aumentata	4
2.1 Industria 4.0	4
2.1.1 CIM 4.0	6
2.2 La realtà aumentata	7
2.2.1 Gli ambiti di utilizzo	9
2.3 I vantaggi della realtà aumentata in ambito industriale	12
3 Stato dell'arte	13
3.1 Gli albori della manutenzione industriale in realtà aumentata	13
3.2 La realtà aumentata nella manutenzione industriale odierna	16
3.3 Applicativi commerciali per manutenzione da remoto con Hololens 2	17
3.3.1 Microsoft Dynamics 365 per Hololens 2	18
3.3.2 Vuforia Chalk	20
4 Progetto e Requisiti	22
4.1 La manutenzione industriale: le tipologie	22
4.2 Definizione della procedura	24
4.3 Confronto tra dispositivi per la realtà aumentata	25
4.4 Microsoft Hololens 2	27
4.5 Analisi dei requisiti	28
5 Le tecnologie	30
5.1 Hardware e Software	30
5.1.1 Blender	31
5.1.2 SolidWorks	34

5.1.3	Unity	36
5.1.4	Visual Studio	38
5.1.5	EinScan-SP 3D scanner	40
5.2	Le librerie	42
5.2.1	MRTK	42
5.2.2	WebRTC	43
5.2.3	PUN2	44
6	Sviluppo di un'applicazione in realtà aumentata per la manutenzione industriale da remoto	46
6.1	Architettura del progetto	47
6.2	Sviluppo delle componenti	48
6.2.1	Ricerca del caso d'uso	48
6.2.2	Creazione del modello 3D	50
6.2.3	Chiamata audio e video	51
6.2.4	Manipolazione condivisa del modello	53
6.2.5	Interfaccia utente	56
7	Risultati e analisi	61
7.1	Definizione dei test sui casi d'uso	62
7.1.1	Questionario sull'usabilità del sistema (SUS)	62
7.1.2	Questionario di simulator sickness (SSQ)	63
7.1.3	Domande aggiuntive basate su TLX VRUSE	65
7.2	Analisi dei risultati	67
8	Conclusioni e sviluppi futuri	74
A	Questionario con test soggettivi	76
	Bibliografia	82

Elenco delle figure

2.1	Elementi che compongono un'industria 4.0	5
2.2	The Reality-Virtuality Continuum	7
2.3	Il sistema Fixture	8
2.4	Un test fisico su Fixture	8
2.5	Ambito medico per l'AR	9
2.6	Ambito industriale per l'AR	9
2.7	Ambito intrattenimento per l'AR	11
2.8	Un disco da Hokey funzionante con il sistema Fox-Trax	11
3.1	Vista esterna dell'applicazione di manutenzione	14
3.2	Vista interna dell'applicazione di manutenzione	14
3.3	Il prototipo della compagnia Boeing per l'assemblaggio	15
3.4	L'AR nel mondo industriale odierno	16
3.5	Microsoft Dynamics 365	18
3.6	Vuforia Chalk	20
4.1	Le tipologie di manutenzione industriale	23
4.2	Microsoft Hololens 2	27
5.1	Schermata di Default di Blender	33
5.2	Schermata di Default di SolidWorks	35
5.3	Interfaccia di Unity	36
5.4	Interfaccia di Visual Studio	39
5.5	Eiscan-SP con tutte le componenti	41
5.6	I pacchetti MRTK disponibili con Mixed Reality Feature Tool e non solo	43
6.1	Design dell'applicativo	47
6.2	Un esempio di elettromandrino marca GMN	49
6.3	Un cuscinetto prodotto da SKF	49
6.4	Esempio di scansione effettuata nello stabilimento SKF con Eiscan-SP	51
6.5	Impostazioni interne su Unity	52

6.6	La gestione del server sul proprio profilo online di Photon	53
6.7	Tutte le macro-categorie di oggetti condivisibili in scena	55
6.8	L'interfaccia dell'applicativo versione Desktop	56
6.9	L'interfaccia dell'applicativo per App Hololens	59
7.1	Test SUS per versione app Hololens 2	68
7.2	Test SUS per versione app Desktop	69
7.3	Test SSQ per versione App Hololens 2, prima dell'utilizzo	70
7.4	Test SSQ per versione App Hololens 2, dopo dell'utilizzo	70
7.5	Domande Extra per versione app Hololens 2	71
7.6	Domande Extra per versione app Desktop	72

Acronimi

API

Application Programming Interface

CIM

Competence Industry Manufacturing

MISE

Ministero dello Sviluppo economico

RV

Reality-Virtuality Continuum

XR

Extended Reality

AR

Realtà Aumentata

HMD

Heads-Mounted-Display

FOV

Field Of View

SDK

Software Development Kit

ICT

Information and Communication Technologies

MR

Realtà Mista

VR

Realtà Virtuale

IA

Intelligenza Artificiale

IoT

Internet of Things

LCD

Liquid-Crystal Display

CPU

Central Processing Unit

RAM

Random Access Memory

CAD

Computer Aided Design

CAE

Computer Aided Engineering

IDE

Integrated Development Environment

MRTK

Mixed Reality Toolkit

PUN2

Photon Unity Networking 2

RPC

Remote Procedure Calls

UWP

Universal Windows Platform

IP

Internet Protocol Address

UI

Interfaccia Utente

FPS

Frame per secondo

Capitolo 1

Introduzione

La Realtà Aumentata (AR) è una delle più grandi tendenze tecnologiche in questo momento, anche mediante l'avvento recentissimo del metaverso, inteso come un mondo parallelo, ibrido tra reale e virtuale, in cui è possibile entrare tramite un proprio alter ego tridimensionale. La tecnologia della Realtà Aumentata è destinata ad a ricoprire un ruolo sempre maggiore, sia per uso privato che industriale, man mano che smartphone e altri dispositivi predisposti per AR saranno più accessibili in tutto il mondo. Essa ci consente di osservare l'ambiente della vita reale e ciò che ci circonda con un potenziamento digitale sovrapposto. Insieme alla Realtà Virtuale è ormai parte integrante del quotidiano, grazie alla ricerca in ambito accademico ed industriale, e agli sviluppi tecnologici volti alla produzione di nuovi dispositivi Hardware e Software, determinati dall'avvento dell'era digitale.

Questa tecnologia, che sta entrando sempre di più nella realtà quotidiana, ha visto il suo primo utilizzo in altri settori, in particolare quello industriale e manifatturiero, ove ha supportato la visualizzazione di informazioni per attività di analisi, formazione e manutenzione. Alla base dello studio di questa tesi vi è proprio la nuova industria 4.0, dove al concetto di industria base sono affiancate tecnologie di Realtà Mista come la Realtà Aumentata, o ancora l'Intelligenza Artificiale e l'Internet of Things. Essa segna l'avvento della quarta rivoluzione industriale, che concettualizza un rapido cambiamento nella tecnologia, nelle industrie, nei modelli e nei processi di produzione della società nel 21° secolo, dovuti alla crescente interconnettività e allo sviluppo dell'automazione intelligente.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è quello di ricercare e sviluppare un applicativo in grado di supportare degli operatori industriali, figure tecniche presenti nella maggioranza degli stabilimenti, in una procedura di manutenzione da remoto. Il software sviluppato prevede due utilizzatori: un utente esperto che da computer guida, nella procedura manutentiva, un tecnico in loco che indossa un caschetto per la Realtà Aumentata sviluppato da Microsoft, Hololens 2. La procedura guidata

avviene sia attraverso una chiamata di tipo audio e video sia tramite la presenza condivisa di un modello 3D dell'esatto modello del macchinario da riparare. Il valore aggiunto è dato dal ruolo attivo espletato, oltre che dall'operatore in loco, anche dall'esperto da remoto, il quale è in grado di manipolare il modello 3D in un ambiente immersivo e di mostrare la procedura da eseguire direttamente sul modello virtuale.

La tesi è articolata in otto capitoli: oltre a questo primo capitolo introduttivo, nel secondo capitolo viene, preliminarmente, fornita un'introduzione che abbraccia i concetti di industria 4.0 e realtà aumentata, contenente anche un excursus storico dei principali ambiti di utilizzo e dei vantaggi che essa ha apportato nel settore industriale. Il terzo capitolo è dedicato allo stato dell'arte e illustra un resoconto della realtà aumentata nella manutenzione industriale dagli inizi dell'epoca fino ad oggi, analizzando gli applicativi commerciali esistenti in tal senso con HoloLens 2. Il quarto capitolo si concentra sul progetto di tesi, basato sulla ricerca di un caso d'uso volto a dimostrare il valore aggiunto introdotto dal progetto di ricerca, mediante una definizione dei requisiti necessari che hanno portato alla costruzione dell'architettura progettuale definitiva, passando per un confronto sull'hardware di realtà aumentata migliore da utilizzare e la raccolta di dati necessari per lo sviluppo dell'applicativo. Il quinto capitolo presenta una panoramica di tutte le tecnologie utilizzate in fase di sviluppo, con le motivazioni che hanno portato alla scelta di tali Hardware e Software rispetto ad altri prodotti analoghi. Nel sesto capitolo l'analisi è imperniata sullo sviluppo vero e proprio, mostrando l'architettura progettuale ed esaminando lo sviluppo delle componenti alla base del progetto di tesi, suddiviso in cinque fasi di sviluppo. Nel settimo capitolo, infine, sono stati definiti i test soggettivi svolti sul caso d'uso, e a seguire un commento sui risultati ottenuti dall'elaborazione ed analisi dei dati, con l'indicazione degli elementi più rilevanti dell'indagine svolta. L'ultimo capitolo, l'ottavo, è infine dedicato alla conclusione del progetto con un racconto degli obiettivi raggiunti cui seguono delle indicazioni per eventuali sviluppi futuri.

Capitolo 2

L'industria 4.0 e la realtà aumentata

2.1 Industria 4.0

Una delle definizioni di industria moderna è che essa sia quella parte di economia che produce beni materiali in modo altamente meccanizzato ed automatizzato[1]. Fin dall'inizio dell'industrializzazione, vi sono stati dei progressi tecnologici che hanno portato a cambiamenti radicali definiti come "Rivoluzioni Industriali". La prima rivoluzione, avvenuta a metà del '700, ha portato cambiamenti nell'ambito della meccanizzazione. La seconda, avvenuta intorno al 1870, fu caratterizzata dall'uso intensivo di energia elettrica. La terza, avvenuta un secolo più tardi, vide l'introduzione della digitalizzazione diffusa. Il nuovo, recente, cambiamento di paradigma nella produzione industriale sembra basarsi sulla digitalizzazione avanzata all'interno delle fabbriche, con una combinazione di tecnologie Internet e tecnologie orientate al futuro tramite dispositivi "smart". La visione futura prevede, infatti, dei sistemi di produzione modulari ed efficienti caratterizzati da scenari in cui sono i prodotti che controllano il proprio processo di produzione. Alla luce di questi avvenimenti è stato coniato un nuovo termine di "Industria 4.0" per una pianificata quarta rivoluzione industriale. Il termine, che prende spunto dal nome dato alle ultime versioni software, descrive un progetto futuro definito da due distinte direzioni di sviluppo. Da un lato c'è un enorme richiamo applicativo, che induce ad una necessità di continui cambiamenti di framework. Esso è dovuto a fattori sociali, economici e politici generali. Dall'altro lato vi è un'eccezionale spinta tecnologica nella pratica industriale, che ha già influenzato anche la routine quotidiana privata. Parole d'ordine in questo caso sono il Web 2.0, le App, gli Smartphone, Laptop, Stampanti 3D ecc..

L'industria 4.0 si riferisce collettivamente ad una vasta gamma di concetti, che

possiamo elencare in:

1. Smart Factory
La produzione sarà completamente dotata di sensori, attori e sistemi autonomi. Utilizzando la "tecnologia intelligente".
2. Cyber-physical Systems
Il sistema fisico e quello digitale si fondono, non vi è più una differenza netta tra i due elementi. Un esempio può essere osservato nell'area della manutenzione preventiva: i parametri di processo (stress, tempo di produzione, usura fisica, etc) delle componenti meccaniche sono registrati digitalmente. La condizione reale del sistema deriva, quindi, dall'oggetto fisico e dai suoi parametri di processo digitali.
3. Self-organization
I sistemi di produzione esistenti stanno diventando sempre più decentralizzati. Ciò si accompagna ad una scissione della gerarchia di produzione classica e ad un cambiamento verso l'auto-organizzazione.
4. Adaptation to human needs
I nuovi sistemi di produzione vengono progettati per seguire i bisogni umani, invece del contrario.

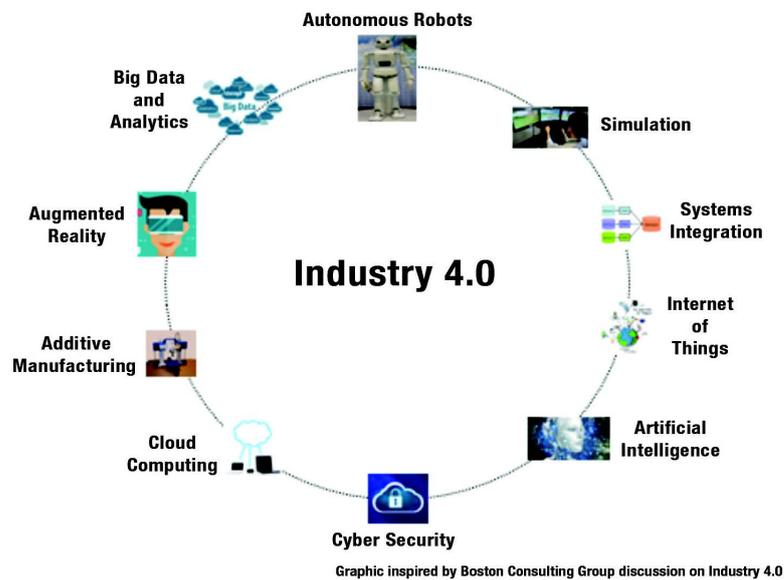


Figura 2.1: Elementi che compongono un'industria 4.0

2.1.1 CIM 4.0

Il Competence Industry Manufacturing 4.0 è un'ente d'eccellenza situato a Torino. I centri di competenza, 8 in tutta Italia, sono nati dopo un bando di selezione indetto dal Ministero dello sviluppo economico (MISE)[2], da cui ricevono parte dei finanziamenti. Essi hanno un ruolo vitale: rendere possibile che l'industria 4.0 esista e arrivi al maggior numero di imprese presenti sul territorio, dalle grandi alle piccole. L'obiettivo del CIM 4.0 è supportare il processo di trasformazione digitale a fianco delle aziende, velocizzandolo e diventando il principale punto di riferimento per l'innovazione tecnologica. Tutte le attività interne vengono svolte grazie a bandi, attività di training e le due linee pilota, Additive Manufacturing Pilot Line e Digital Factory Pilot Line[3].

La prima linea copre l'intera catena dei processi di produzione additiva manifatturiera, dalla creazione dei modelli 3D, attraverso la produzione e fino alla lavorazione finale e all'ispezione dei componenti. La seconda, dove è stato svolto il lavoro di tesi, rappresenta il luogo in cui le aziende possono esplorare le ultime tecnologie digitali adottate per aumentare l'efficienza produttiva e la competitività del business. La digitalizzazione viene così resa accessibile a tutti, offrendo supporto, analisi e sperimentazioni sul campo tramite cobot, agv interconnessi, manutenzione predittiva, realtà virtuale ed aumentata.

2.2 La realtà aumentata

All'inizio degli anni '90, i ricercatori Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi e Fumio Kishino hanno introdotto un concetto chiamato The Reality-Virtuality Continuum (RV)[4]. Sebbene i ricercatori abbiano sviluppato la definizione per descrivere la realtà mista e le tecnologie di visualizzazione dell'epoca, la struttura originale e i concetti sono ancora alla base di tutto ciò oggi viene definito Extended Reality (XR)[5], al cui interno sono racchiusi tutti gli aspetti legati agli ambienti virtuali e reali generati dalle tecnologie informatiche e da dispositivi indossabili. Il loro studio abbraccia lo spazio tra la realtà, dove tutto è fisico, e la realtà virtuale, dove il virtuale e la computer grafica sostituiscono l'ambiente fisico, come si evince in Fig.2.2:

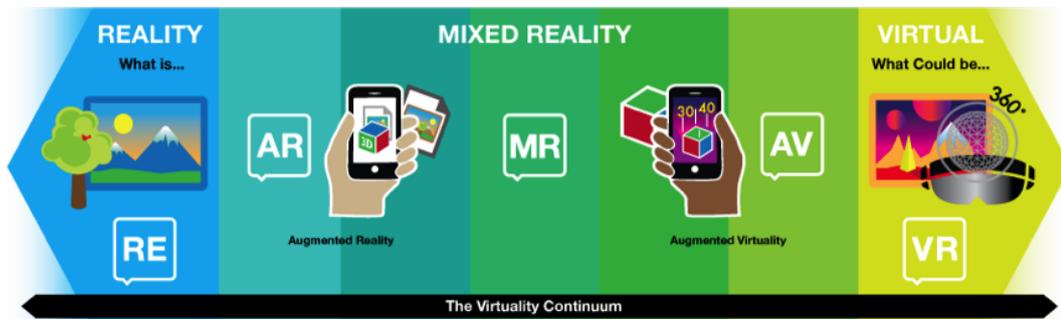


Figura 2.2: The Reality-Virtuality Continuum

Tra i due poli opposti sono presenti i concetti di realtà mista, composta da realtà aumentata, virtualità aumentata e virtuale, senza soluzione di continuità. La realtà aumentata (AR) aggiunge contenuti virtuali ad un ambiente prevalentemente reale, mentre la virtualità aumentata aggiunge contenuti reali ad un ambiente prevalentemente virtuale. Nonostante siamo entrambe sottoinsiemi della realtà mista, la maggior parte della ricerca nell'area si concentra sulla realtà aumentata. Le tecnologie in ambito AR sfruttano le relazioni spaziali tra l'utente, le informazioni digitali e l'ambiente reale, per consentire una presentazione dei dati intuitiva ed interattiva[6].

Le caratteristiche di questo sistema sono state raggruppate nell'opera di Azuma (1997)[7] in tre criteri classici ancora oggi ampiamente utilizzati:

1. Combinare virtuale e reale

Le tecnologie in realtà aumentata devono consentire all'utente di vedere contemporaneamente il virtuale e il reale in una vista combinata. I display tradizionali possono mostrare solo immagini generate al computer, pertanto sono insufficienti per l'AR.

2. Presenza del 3D

La realtà aumentata di basa su una combinazione di virtuale e reale fondata sulla loro relazione geometrica. Ciò rende possibile il rendering del contenuto virtuale con il giusto posizionamento e prospettiva 3D rispetto alla realtà.

3. Interattività real-time

Il sistema deve funzionare ad un frame rate interattivo, in modo tale da potersi sovrapporre alle informazioni in tempo reale e consentire l'interazione dell'utente.

La realtà aumentata si caratterizza dunque per il modo in cui le componenti del mondo digitale si fondono con il mondo reale nella percezione del singolo individuo che la sperimenta. Il soggetto non solo visualizza i dati ma prova una sensazione immersiva di integrazione con i due ambienti fusi insieme. I primi sistemi di AR furono sviluppati all' inizio degli anni '90, con il Virtual Fixtures system prodotto dall' Armstrong Laboratory, un organizzazione scientifica di ricerca e sviluppo operante sotto l' U.S Air Force[8].



Figura 2.3: Il sistema Fixture



Figura 2.4: Un test fisico su Fixture

Poichè la grafica 3D era ancora poco performante all'epoca per presentare una realtà aumentata fotorealistica e immersiva, il Virtual Fixtures utilizzava due veri robot fisici[9], controllati da un esoscheletro per la parte superiore del corpo indossato dall'utente. Per simulare l'esperienza immersiva, venne impiegata una configurazione ottica che prevedeva una coppia di lenti di ingrandimento binoculari allineati in modo tale che la vista delle braccia robotiche fosse sovrapposta nell'esatta

posizione delle braccia reali dell'utente. Il risultato finale dell'esperimento consentiva all'utilizzatore di vivere un'esperienza immersiva nello spazio, in cui muovendo le braccia, vedeva le braccia robotiche muoversi nel punto in cui avrebbero dovuto trovarsi le sue braccia. Oltre ciò, erano presenti anche altre sovrapposizioni virtuali, quali barriere e guide, per assistere l'utente durante l'esecuzione dei compiti fisici reali.

Sempre su questo primo sistema furono condotti dei test[10], somministrati a gruppi di utenti, attraverso i quali venne dimostrata per la prima volta la possibilità di un miglioramento significativo delle prestazioni umane in compiti svolti nel mondo reale a cui sono applicate sovrapposizioni di realtà aumentata immersiva.

2.2.1 Gli ambiti di utilizzo

Secondo uno studio di Mekni e Lemieux[11] sono state individuate almeno 12 classi di domini di applicazioni per la realtà aumentata. Tra questi vi è l'ambito medico, militare, manifatturiero, dell'intrattenimento, della visualizzazione e della robotica. Domini più recenti riguardano invece l'educazione, il marketing, la pianificazione di percorsi e navigazione, il turismo e la pianificazione urbana.

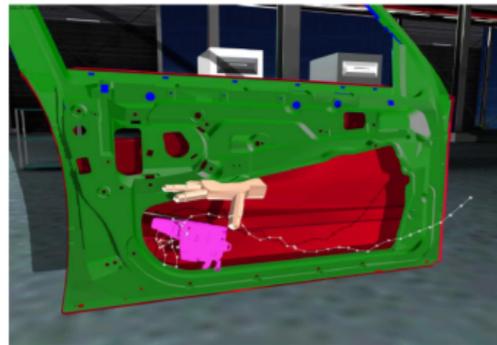


Figura 2.5: Ambito medico per l'AR **Figura 2.6:** Ambito industriale per l'AR

E' stato già illustrato, nel paragrafo precedente, un primo esempio di utilizzo di realtà aumentata per aumentare le prestazioni degli utenti nello svolgimento di un'operazione. Nel caso militare ad esempio, un sistema di realtà aumentata può essere utilizzato per visualizzare la scena reale del campo di battaglia con l'aggiunta di informazioni virtuali aggiuntive. Sono famosi in questo senso i caschi prodotti dalla compagnia Liteye per usi militari. Altro caso è per i sistemi di pilotaggio in aeronautica militare: le attività svolte all'interno della cabina di pilotaggio vedono il supporto di dispositivi Heads-Mounted-Display (HMD's) che consentono la visualizzazione di dati digitali o supporto alla navigazione notturna all'interno del campo visivo dell'utente (FOV) sin dagli anni '60[12].

Per quanto riguarda l'ambito manifatturiero, la ricerca sulle possibili applicazioni in questo campo è in forte crescita. La sfida nel campo della produzione e manifattura è la progettazione e implementazione di sistemi di produzione in realtà aumentata integrati che potrebbero migliorare i processi di produzione, nonché lo sviluppo dei prodotti e processi, portando a tempi di consegna più brevi, costi ridotti e qualità migliore[13]. L'obiettivo finale è creare un sistema che partendo dalla realtà la renda migliore e più efficiente, ponendo come punto di forza la possibilità, da parte degli applicativi che sfruttano la realtà aumentata, di migliorare la percezione dell'ambiente circostante per l'utilizzatore. Le attività di manutenzione, assemblaggio e training vengono svolte con maggiore semplicità, velocità e chiarezza. In questi casi la realtà aumentata si presenta come interfaccia grafica virtuale per mostrare istruzioni precedentemente codificate, o sequenze di animazione per la fase di progettazione. Tutte le scene individuate possono essere mostrate su richiesta e sovrapposte virtualmente ai prodotti reali delle linee di montaggio quando necessari, o aggiornate periodicamente dai produttori[14].

Altro ambito di sviluppo è quello medico, dove i medici potrebbero utilizzare la realtà aumentata come ausilio la visualizzazione o per il training in ambito chirurgico. Potrebbe essere possibile raccogliere un dataset 3D del paziente in tempo reale, usando sensori non invasivi quali quelli ad ultrasuoni. Questi dataset possono poi essere renderizzati in tempo reale e combinati con l'aspetto reale del paziente. Il medico avrebbe quindi la sensazione di vedere internamente il paziente, come se fosse dotato di vista a raggi-X, grazie alla tecnologia. Nel caso di piccole operazioni di chirurgia minimamente invasiva, dove vengono effettuate incisioni piccole o nessuna incisione, la realtà aumentata si rileva incredibilmente utile. Il problema, in queste tipologie di interventi, è che essi riducono la capacità del medico di vedere all'interno del paziente, rendendo l'intervento chirurgico più difficile. L'AR potrebbe essere utile in tal senso per fornire una visione interna data da dataset precedentemente acquisiti senza la necessità di effettuare incisioni maggiori. Altro caso d'uso, sempre in quest'ambito, è la possibilità di fornire informazioni generali quali i parametri vitali del paziente all'interno della sala operatoria, o sovrapporre una serie di dati contemporaneamente. Per il training degli specializzandi, possono essere sviluppati applicativi per il training che guidino, ad esempio, in attività di precisione come mostrare dove praticare un'incisione nel cranio durante un intervento chirurgico, o come eseguire una corretta biopsia con aghi a piccole dimensioni per le rilevazioni tumorali[12].



Figura 2.7: Ambito intrattenimento per l'AR

Uno degli ambiti di ricerca e sviluppo per la realtà aumentata che consentirebbe una diffusione su larga scala è sicuramente quello del gaming e dell'intrattenimento[7]. In questo settore gli applicativi sono orientati alla creazione di giochi, ma anche ad aumentare le informazioni mostrate durante eventi sportivi. In questi casi in cui viene raggiunto un pubblico più vasto, a beneficiare dell' AR possono essere anche inserzionisti per la visualizzazione di annunci virtuali e pubblicizzazione di prodotti.

Un esempio di applicazioni di realtà aumentata nel settore sportivo è il sistema Fox-Trax, che viene utilizzato per evidenziare la posizione di un disco da hokey durante la partita, difficilmente visibile nella realtà mentre si muove rapidamente sul ghiaccio[15].



Figura 2.8: Un disco da Hokey funzionante con il sistema Fox-Trax

Per quanto riguarda il gaming e i social, tra gli applicativi più utilizzati spicca sicuramente Snapchat, che mette insieme aziende ed utenti. Il suo funzionamento è semplice: sfruttando ambo le fotocamere presenti su uno smartphone o tablet, consente di visualizzare effetti ed elementi virtuali sovrapposti alla realtà in tempo reale[12].

2.3 I vantaggi della realtà aumentata in ambito industriale

Sebbene la ricerca sia molto attiva sugli usi e sviluppi della realtà aumentata, con un conseguente aumento di speculazioni sul potenziale, ci sono pochi studi empirici sulla sua efficacia. Nel documento presentato da Tang et al.[16] viene mostrato un esperimento che ha testato l'efficacia di utilizzo della realtà aumentata in un'attività di assemblaggio. Le istruzioni sull'attività da svolgere sono visualizzate nel campo visivo dell'utente e somministrate all'interno dell'area di lavoro come oggetti 3D, mostrando progressivamente l'esatta esecuzione della procedura. Per un confronto con le altre tecniche di apprendimento, oltre all'AR sono stati utilizzati tre supporti: un manuale stampato cartaceo, delle istruzioni erogate tramite documento elettronico al computer e un caschetto indossabile (HMD) per la realtà aumentata. I risultati indicano che la sovrapposizione di istruzioni 3D sul piano di lavoro da eseguire ha ridotto dell'82% il tasso di errore per un'attività di assemblaggio, diminuendo in particolare gli errori cumulativi, ovvero quelli dovuti a precedenti errori di assemblaggio. Per quanto concerne la misurazione dello sforzo mentale, lo studio ha indicato una diminuzione dello sforzo mentale in caso di istruzioni erogate tramite realtà aumentata, suggerendo forse che parte del calcolo mentale per le istruzioni da svolgere pesa sul sistema dell'applicativo più che sull'addetto al lavoro.

In sintesi, questo approccio semplifica il numero di informazioni richieste e riduce i tempi di formazione per gli operatori di montaggio, con meno sovraccarico di informazioni da tenere a mente. Oltre a ridurre i tempi di assemblaggio di un prodotto, ne consegue una riduzione dei tempi di consegna, a vantaggio dell'industria[13].

Capitolo 3

Stato dell'arte

In uno studio presentato da Palmarini et al.[17] del 2018 si evince come le tecnologie di realtà aumentata (AR) per supportare le operazioni di manutenzione sono argomento di ricerca accademica da più di 50 anni. Sempre nello studio, viene specificato come solo nell'ultimo decennio siano stati compiuti progressi importanti e la tecnologia AR sia già presente in alcuni apparati industriali, passaggio che ai giorni nostri risulta ancora più evidente. Sono numerosi gli studi sulla manutenzione industriale in tal senso che mostrano risultati promettenti nel miglioramento delle prestazioni umane quando si svolgono attività di manutenzione tecnica. Il capitolo contiene un excursus storico della realtà aumentata nell'ambito della manutenzione industriale, dagli inizi agli ultimi anni e presenta inoltre due dei più famosi applicativi esistenti in tal senso per HoloLens 2.

3.1 Gli albori della manutenzione industriale in realtà aumentata

Per manutenzione industriale si intendono tutte quelle azioni volte a ripristinare qualsiasi funzionalità di un macchinario all'interno del suo ciclo di vita. Le azioni che possono essere eseguite per ripristinare le funzionalità dello stesso possono essere tecniche, amministrative e gestionali. Per argomento di tesi, ci si concentrerà sulla prima funzionalità tecnica. Nello studio condotto da Palmarini et al. vengono analizzati circa 30 articoli scientifici riguardanti l'uso della realtà aumentata per la manutenzione industriale, sia essa intesa come riparazione di un macchinario che come training alla riparazione.

Gli studi condotti da Azuma[7] rappresentano un punto di partenza chiaro per l'utilizzo della realtà aumentata nel campo a partire dai primi sviluppi. Secondo lo studioso, le istruzioni diventerebbero più facili da capire se, al posto di dover far riferimento a testo e immagini presenti in manuali cartacei, si avessero ologrammi

3D sovrapposti all'attrezzatura reale, che mostrano passo dopo passo il compito da svolgere. Un primo esempio proposto è un applicativo per la manutenzione di una stampante laser sviluppato alla Columbia University, e prevede l'utilizzo di un caschetto.



Figura 3.1: Vista esterna dell'applicazione di manutenzione

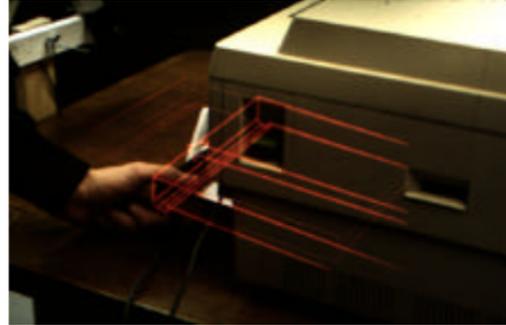


Figura 3.2: Vista interna dell'applicazione di manutenzione

Nelle immagini presentate è possibile osservare un esempio del progetto sviluppato: a sinistra ciò che è reale, a destra ciò che vede l'utente usando l'applicativo. In questo primo caso, vengono generati degli elementi in realtà aumentata che consentono all'utente di estrarre correttamente il vano carta.

Altro caso presentato appartiene ad uno studio condotto dall'azienda Boeing, che nel 1997 sviluppò una tecnologia in realtà aumentata per la manutenzione di sistemi di aviazione. L'applicativo consentiva di guidare un tecnico per la costruzione di un cablaggio elettrico di un aeroplano. Venne analizzata una riduzione dei tempi dovuti alla non necessaria memorizzazione di istruzioni, le quali venivano rappresentate olograficamente indossando un caschetto per la realtà aumentata. Non solo, venne constatata anche una riduzione degli spazi: fino ad allora, i tecnici per l'assemblaggio dei cavi utilizzavano tavole di riferimento di grandi dimensioni (dovute alla grandezza del velivolo) richiedendo diversi magazzini per la conservazione. Usando l'applicativo in AR, non vi sarebbe stata più necessità delle tavole.



Figura 3.3: Il prototipo della compagnia Boeing per l'assemblaggio

Vi sono poi dei primi sviluppi antecedenti alle ricerche di Azuma. Nel 1992, T. P. Caudell e D. W. Mizell. pubblicarono uno studio[13] per lo sviluppo di un applicativo in realtà aumentata tramite caschetto (HMD) per i processi manifatturieri. I due studiosi compresero che già agli inizi degli anni '90 il mondo industriale si stesse orientando su sistemi sempre più complessi, sia nei prodotti che nei processi di produzione. Il personale all'interno delle fabbriche era tenuto a memorizzare informazioni sempre più complesse, impiego che rappresentava la maggior difficoltà lavorativa. Se vi fosse stato un metodo per consentire ai lavoratori, ad esempio, di visualizzare dei CAD digitali durante l'esecuzione di una procedura di manutenzione o montaggio, la possibilità di errore umano sarebbe diminuita.

Da queste premesse scaturisce lo studio dei due ricercatori, che sfruttando le tecnologie di realtà aumentata tramite caschetto, ha l'obiettivo di semplificare la vita dell'operaio con informazioni sovrapposte alla realtà, le quali mutano dinamicamente sulla base dell'operazione da svolgere. Ad esempio, un utente potrebbe guardare una parte di un macchinario, e vedere la posizione esatta di un foro indicato da una freccia in 3D, insieme alla dimensione del trapano da utilizzare sulla base della profondità del foro. Il tutto specificato in un testo scritto all'interno di una finestra mobile e virtuale accanto alla freccia. Se l'utente dovesse cambiare la sua prospettiva sulla sezione del macchinario, l'indicatore grafico rimarrebbe nello stesso luogo fisico.

Ultimo studio, presentato da Ong et al.[18] nel 2008 si concentrò in particolare su alcuni problemi che ostacolarono, in quell'epoca, l'applicazione della realtà aumentata nel campo manifatturiero. In esso sono stati illustrati i requisiti che un'applicazione AR in tal senso dovrebbe garantire in tre elementi chiave:

1. mantenere la consapevolezza del contesto
L'utilizzatore deve sfruttare la tecnologia per raccogliere informazioni da utilizzare nella realtà, evitando di distaccarsi da essa
2. adattare la tecnologia ai contesti
I dettagli delle istruzioni di manutenzione possono variare in base alle competenze individuali dei tecnici. In secondo luogo, le informazioni sulla manutenzione fornite dovrebbero essere modificabili e facilmente aggiornabili .
3. Inserire degli strumenti per l'assistenza remota
Dovrebbero essere forniti degli strumenti adeguati per consentire la collaborazione con esperti remoti, in grado di creare istruzioni in realtà aumentata per assistere i tecnici in loco.

Su questi principi, Ong et al. svilupparono ARAMS[19] nel 2013, un primo sistema multifunzione per la manutenzione industriale che rispettava tutte le condizioni precedenti, seppur primitivo.

3.2 La realtà aumentata nella manutenzione industriale odierna



Figura 3.4: L'AR nel mondo industriale odierno

Con l'evoluzione delle tecnologie ICT (Information and Communication Technologies) e la massiccia diffusione della realtà aumentata (AR), la comunità di ricerca ha moltiplicato gli studi per sfruttare i vantaggi dell'AR per la proiezione di dati durante le operazioni di manutenzione[20].

In generale, con l'avvento dell'Industria 4.0 e nel tentativo di collegare il mondo fisico con quello virtuale, sono emerse nuove tecnologie. Tra queste quelle che si

prestano meglio all'obiettivo sono la Realtà Aumentata (AR), la Realtà Mista (MR) e la Realtà Virtuale (VR). Tutte queste tecnologie digitali sono state raggruppate sotto il termine generico di Extended Reality (XR).

L'avanzamento tecnologico ha fatto sì che molti dei principi discussi nel paragrafo precedente siano sempre rispettati, e vi sono ad oggi moltissimi applicativi che consentono una risoluzione dei problemi flessibile ed accurata. La manutenzione a distanza in tempo reale sfruttando la realtà aumentata è adesso un fatto concreto. Come risultato, ad oggi sono moltissime le aziende del settore manifatturiero, industriale ed automotive che sfruttano queste tecnologie. Tra queste ultime vi è il caso di BMW[21], che dal 2019 ha introdotto nuove tecnologie di comunicazione tra i concessionari e le officine, che aiutano i centri BMW a ridurre i tempi di riparazione e manutenzione, aumentando così l'efficienza dell'officina e migliorando la soddisfazione dei clienti. Le tecnologie sfruttano l'AR e degli occhialini per la realtà aumentata, gli TSARAVision Smart Glasses.

Altro esempio è Tesla[22], la quale ha sviluppato un programma AR che automatizza la calibrazione e la configurazione delle auto in uscita dalla catena di montaggio, sfruttando Google Glass.

Vi sono poi aziende ad esempio Siemens[23], che gioca un duplice ruolo: utilizzatore e produttore. La multinazionale ha compreso fin da subito l'importanza della realtà aumentata nell'ottimizzazione dei processi interni, investendo anni di ricerca e sviluppo per il progetto Glass@Service. Nel progetto, sono stati sviluppati degli occhialini intelligenti che includono controlli gestuali e visivi, consentendo attività di formazione e manutenzione. L'obiettivo di Siemens è quello di avere un ruolo attivo nel progresso verso l'industria 4.0.

3.3 Applicativi commerciali per manutenzione da remoto con HoloLens 2

L'avvento di Microsoft HoloLens 2, rilasciato ad inizio 2020 come successore del primo HoloLens, non è passato inosservato agli sviluppatori di realtà aumentata e alle industrie, che ne hanno subito colto il potenziale per le operazioni di manutenzione da remoto. E' stata la stessa casa madre ad offrire, poco più avanti, un primo applicativo per le industrie che consente di ottimizzare le operazioni e la produttività interne, Microsoft Dynamics 365. Sul sito ufficiale di HoloLens 2[24] sono elencate alcune delle principali soluzioni alternative sviluppate da aziende esterne, con casi d'uso reali per ciascun applicativo. Tra queste, oltre all'applicativo sviluppato dalla stessa Microsoft, quella che è stata ritenuta più utile al fine di un confronto con il progetto di tesi è Vuforia Chalk, poichè dedicata esclusivamente all'assistenza da remoto.

3.3.1 Microsoft Dynamics 365 per HoloLens 2



Figura 3.5: Microsoft Dynamics 365

Dynamics 365 per HoloLens 2 è suite di prodotti sviluppata direttamente da Microsoft per svolgere una serie di operazioni. Per sfruttare a pieno le potenzialità del nuovo prodotto, la casa produttrice ha reso disponibili due software all'interno di Dynamics 365: Dynamics 365 Guides e Dynamics 365 Remote assist.

Con il primo[25] si intendono aiutare gli operatori nello svolgimento del proprio lavoro, fornendo istruzioni olografiche quando e dove necessarie. Queste istruzioni, presentate graficamente come schede, sono legate visivamente al luogo in cui viene svolto il lavoro e possono includere immagini, video e modelli olografici 3D. Gli operatori vedono esattamente cosa deve essere fatto e dove, con il vantaggio di portare a termine il lavoro più velocemente, con meno errori e minore richiesta di competenze. Se necessario inoltre, possono effettuare una chiamata con un esperto da remoto usando Microsoft Teams. In questi casi, l'esperto remoto può vedere cosa vede l'operatore su HoloLens, guidandolo nella procedura.

L'obiettivo di Dynamics 365 Remot Assist è leggermente diverso[26]. In questo caso, ruolo chiave è consentire ai tecnici di collaborare in modo più efficiente da postazioni diverse e su più dispositivi, spaziando da HoloLens, HoloLens 2, Android o iOS. I casi d'uso, presentati dalla casa produttrice stessa, sono i seguenti:

1. Manutenzione e riparazione

Essa consente ai tecnici di risolvere i problemi più velocemente, utilizzando come strumento principale la videochiamata in tempo reale tra Microsoft HoloLens 2 e dispositivi mobili, con i tecnici in grado di ricevere indicazioni da esperti in remoto.

2. Ispezioni a distanza

Gli ispettori in loco sono in grado di collaborare con gli ispettori a distanza per valutare e prendere nota delle condizioni dei macchinari.

3. Condivisione delle conoscenze e formazione

E' possibile documentare le riparazioni tramite foto e video e condividerle con il resto dell'azienda qualora sia previsto un sistema di dati Cloud.

I Benefits dati dall'uso di questo applicativo sono facilmente individuabili, e a differenza di altri applicativi prodotti da case di sviluppo secondarie, in questo caso vengono sfruttate a pieno tutte le potenzialità di casa Microsoft e dei loro prodotti. Risulta possibile, ad esempio, risolvere problemi in tempo reale con una chiamata che sfrutta le prestazioni di Microsoft Teams. Vengono ridotti i costi di viaggio, consentendo una riparazione a distanza senza inviare gli ispettori localmente in posti remoti. La comunicazione tra i due attori in gioco è resa efficiente attraverso schede, disegni, frecce che consentono di indicare specifiche componenti del dispositivo da riparare o ispezionare. Qualora ciò non fosse sufficiente, è possibile mostrare immagini e sequenze video in grado di replicare la procedura da eseguire. E' poi possibile sfruttare altri tool come Microsoft Power Platform, che archivia foto e video di realtà mista ed integra tali dati con i processi aziendali in un esempio perfetto di industria 4.0.

Ad oggi grandi compagnie quali Siemens, HP, BMW, ed Adobe rientrano tra gli utilizzatori principali di Microsoft Dynamics 365.

3.3.2 Vuforia Chalk



Figura 3.6: Vuforia Chalk

Vuforia Chalk[27] è un software prodotto dalla compagnia americana PTC (Parametric Technology Corporation), fondata nel 1985 a Boston. La società acquisì nel 2015 Vuforia, all'epoca un kit di sviluppo software (SDK) per la realtà aumentata su più dispositivi, dai computer ai tablet o caschetti quali Hololens.

Vuforia, in generale, sfrutta tecniche di intelligenza artificiale per riconoscere gli oggetti in tempo reale e tracciare su di essi modelli 3D virtuali degli stessi, o ancora mostrando componenti aggiuntive e strumenti di guida.

Più specificatamente orientato all'assistenza da remoto attraverso realtà aumentata è l'applicativo Vuforia Chalk, che ha l'obiettivo di riunire tecnici in loco ed esperti da remoto per risolvere i problemi in modo più rapido ed efficace, attraverso una collaborazione in tempo reale. La parola chiave è la possibilità di comunicare ma non solo, viene sfruttata la realtà aumentata per velocizzare il processo di guida, il supporto e fornire maggiori competenze per la risoluzione dei problemi all'interno della fabbrica.

La componente tecnologica innovativa si presenta attraverso la possibilità, da parte degli esperti, di poter disegnare annotazioni digitali su un qualsiasi schermo mobile o desktop, che vengono sovrapposti agli oggetti fisici reali, consentendo di guidare il tecnico nell'esecuzione di una procedura, passo dopo passo.

Grazie a Software di questo tipo, la realtà aumentata diventa ampiamente disponibile per tutti e rapidamente accessibile, consentendo di essere scaricata su un'ampia gamma di dispositivi. I punti di forza del software, presentati dalla casa produttrice stessa, sono i seguenti:

1. Consentire la guida da parte di esperti sempre e ovunque
Vuforia Chalk consente alle industrie di condividere rapidamente le conoscenze degli esperti ai dei tecnici operativi utilizzando i dispositivi mobili più comuni.
2. Ridurre i tempi di viaggio in loco
Essa consente di risolvere e riparare i problemi più rapidamente consentendo ai lavoratori in prima linea, con il supporto della realtà aumentata in tempo reale, di avere sempre a disposizione un team di esperti. Elimina i costi di viaggio non necessari e i costi associati a manutenzioni di routine.
3. Migliorare i tempi di attività ed efficienza
Essa si pone di ridurre i tempi di inattività e accelera la risoluzione dei problemi tramite il collegamento in tempo reale.
4. Maggiore sicurezza e conformità
La possibilità, da parte di un esperto da remoto, di poter indicare e posizionare annotazioni consente di proteggere i tecnici sul campo mentre effettuano manutenzione di macchinari o in ambienti di lavoro pericolosi, minimizzando errori ed incidenti.
5. Abilita il self-service dei clienti
L'applicativo consente alle aziende di risolvere autonomamente i problemi in loco, abilitando il contatto diretto con gli esperti di cui hanno bisogno.

Un caso di studio di un'azienda che ha scelto Vuforia Chalk con Hololens 2 per le attività di manutenzione da remoto è Howden[28]. L'azienda scozzese si occupa di fornire prodotti industriali ai clienti per migliorare i processi quotidiani, dalla ventilazione delle miniere al trattamento di acque reflue, ad operazioni di riscaldamento e raffreddamento. Per consentire ai propri clienti di ottimizzare le prestazioni dei macchinari e migliorarne l'efficienza operativa, si è reso necessario migliorare i propri processi di assistenza e manutenzione, con l'obiettivo di fornire informazioni importanti in modo visivo e facilmente osservabile.

La scelta di Hololens 2 non è stata casuale: il dispositivo consente infatti di sfruttare la realtà mista mantenendo le mani libere, facilitando le operazioni di manutenzione. Oltre ciò, la possibilità di sfruttare il cloud computing per l'IoT (Internet of Things) con Hololens e visualizzare dati in tempo reale dai sistemi embedded.

Capitolo 4

Progetto e Requisiti

Obiettivo della tesi è la progettazione e lo sviluppo di un applicativo in realtà aumentata per la manutenzione industriale da remoto. Per fare ciò, è stato necessario approfondire l'ambito della manutenzione industriale per la definizione dei requisiti. Successivamente, è stato effettuato un confronto tra le diverse tipologie di dispositivi esistenti per la realtà aumentata, al fine di individuare quelli in grado di soddisfare maggiormente i requisiti, con un approfondimento sul dispositivo utilizzato per il lavoro di tesi, Hololens 2.

L'unione di questi elementi ha consentito lo sviluppo di un'architettura del progetto applicativo, che costituisce il fondamento per l'implementazione pratica.

4.1 La manutenzione industriale: le tipologie

Nel significato tecnico della manutenzione industriale rientrano tutti quei controlli funzionali, assistenza, riparazione o sostituzione di attrezzature e macchinari in installazioni industriali[29]. Per un'azienda del settore industriale un tema cruciale e di primaria importanza è mantenere le prestazioni ottimali di strumenti e macchinari, in quanto è sinonimo di sicurezza. Inoltre, la manutenzione preventiva può avere un impatto significativo sui costi operativi, evitando così di affrontare in modo reattivo un problema quando si verifica.

Vi sono diverse tipologie di manutenzione, come illustrato in Fig.4.1 tratta dal libro "An Introduction to Predictive Maintenance" di R.K. Mobley:

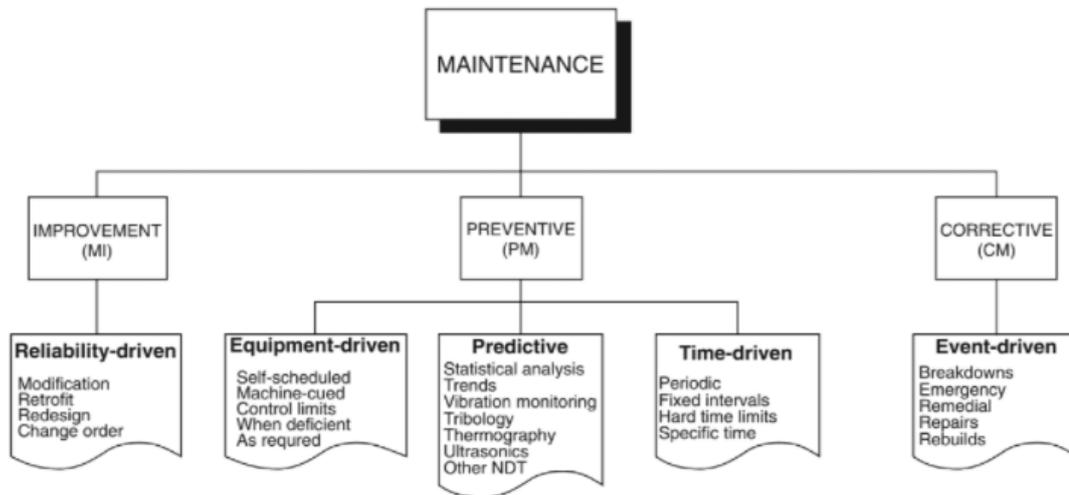


Figura 4.1: Le tipologie di manutenzione industriale

Come illustrato in Fig.4.1, la manutenzione preventiva ha lo scopo di prevenire il verificarsi di guasti gravi con un piano di manutenzione periodica ben definito. Esso si traduce in genere con attività di manutenzione programmate in base al tempo o all'utilizzo delle risorse come, ad esempio, il cambio dell'olio in un'automobile al raggiungimento del limite dei chilometri percorsi.

Il vantaggio di effettuare questo tipo di attività è la riduzione di frequenza di guasti gravi, con una conseguente diminuzione dei costi di riparazione. Un possibile svantaggio potrebbe derivare dal fatto che le parti possono essere sostituite o lubrificate prima ancora che inizino ad usurarsi, con possibili danni collaterali dovuti proprio all'eccessiva manutenzione. Proprio per questo motivo, e grazie all'avvento dell'industria 4.0, alla manutenzione preventiva si accosta spesso la manutenzione predittiva, che consiste nell'effettuare un monitoraggio costante delle apparecchiature. Tramite IoT, avvalendosi di sensori posti sulle macchine stesse e sfruttando l'intelligenza artificiale (AI) si può disporre di una raccolta di dati che, se analizzati in tempo reale, consente di individuare per tempo eventuali possibili guasti o segnali di usura.

La manutenzione correttiva che è quella più comune si ha quando si risolve un guasto che non era stato schedulato, ma semplicemente si è verificato, la cui manutenzione richiede l'esecuzione di procedure standard. Questa tipologia di manutenzione ha dei vantaggi a condizione che il costo della riparazione non risulti elevato, o si tratta di parti usa e getta destinate a essere sostituite anziché riparate, o l'intero macchinario non sia di difficile sostituzione. Se così non fosse, sarebbe il guasto peggiore per un'industria, poichè potrebbe portare all'interruzione della produzione stessa, e quindi ad un minor guadagno.

Ultima in analisi è la manutenzione di miglioramento, che consiste in uno studio sulla manutenzione effettuato in fase di progettazione, che ha come obiettivo individuare e prevenire i problemi che potrebbero accadere. Applicazioni di questo genere implicano una modifica della struttura stessa, come ad esempio un re-design, un cambio di ordine di produzione o un utilizzo di prodotti diversi per la lubrificazione. Tra queste tipologie di manutenzione industriale[30], quelle che trovano maggiori applicazioni per la manutenzione da remoto in realtà aumentata, sono la manutenzione correttiva, che si ha quando un utente esperto può guidare un tecnico da remoto nella riparazione di un guasto in tempi brevi riducendo i costi, e la manutenzione predittiva, che si ha quando vengono eseguite procedure di riparazione standard e ripetitive, seguendo delle istruzioni pre-compilate.

4.2 Definizione della procedura

Con riferimento al capitolo precedente, gli attuali applicativi esistenti per la realtà aumentata da remoto in ambito industriale devono consentire agli esperti, non presenti sul luogo di riparazione, di effettuare ispezioni a distanza tramite chiamata audio e video fluida e chiara. Devono inoltre avere la possibilità di condividere le proprie conoscenze o formare nuovi tecnici in loco, senza essere fisicamente presenti. La condivisione di conoscenze, grazie alla realtà aumentata, può avvenire tramite ologrammi 3D o tramite schede virtuali con foto e video della procedura da eseguire, il tutto in tempo reale.

Come detto precedentemente, il grande vantaggio dell'impiego di questa tecnologia è consentire agli operatori sul posto di non avere bisogno di una grande conoscenza completa, di poter avere entrambi gli arti superiori liberi di operare e di poter ricevere un'assistenza continua.

Una procedura standard per la manutenzione industriale da remoto prevede due attori principali[26]:

1. Operatore tecnico

E' una figura alla base di ogni azienda operante nel settore industriale, che in questo caso svolge il ruolo aggiuntivo di utilizzatore della realtà aumentata, tramite un dispositivo a caschetto come HoloLens o mobile. Esso deve condividere ciò che sta vedendo e ricevere assistenza remota.

2. Collaboratore remoto

E' una figura di maggior competenza rispetto al tecnico, ed è colui che presta le proprie conoscenze per collaborare con gli operatori sul posto. Insieme, valutano e documentano la qualità dei macchinari o partecipano alla procedura di manutenzione fungendo da guida. Non è obbligatorio, per questo ruolo, la sperimentazione della realtà aumentata: nella maggioranza degli applicativi

in tal senso, l'operatore da remoto utilizza una postazione Desktop e vede, tramite display, ciò che inquadra il tecnico.

Un esempio di flusso del lavoro per una manutenzione da remoto standard, senza considerare la realtà aumentata, prevede una serie di fasi. Inizialmente, l'operatore tecnico si trova nel luogo del guasto, in genere localizzato nello stesso ambiente in cui lavora o nelle immediate vicinanze. Il suo lavoro consiste nel riparare una macchina, ma trova davanti ad un macchinario complesso di cui non ha abbastanza conoscenza. Optando per una manutenzione da remoto, l'operatore avvia una chiamata di tipo audio e video con un collaboratore esperto. Il modo in cui può avvenire questa chiamata, e la tecnologia impiegata, sono variabili interne a ciascuna azienda. L'esperto si unisce alla chiamata e inizia l'esecuzione della procedura. Da remoto, egli fornisce le istruzioni sia verbalmente che tramite aiuti visivi (ad esempio una freccia indicatrice di una componente da rimuovere). Il tecnico, quindi, ripara correttamente la macchina, e la chiamata ha termine. In base al tipo di tecnologie utilizzate, è possibile che la chiamata audio e video venga registrata, e il tecnico o l'esperto possano vedere e condividere la registrazione in futuro.

4.3 Confronto tra dispositivi per la realtà aumentata

Una delle caratteristiche principali della realtà aumentata è la capacità dell'utente di vedere il proprio ambiente pur utilizzandola[31]. Il modo in cui essa viene sovrapposta alla realtà però, inteso come l'utente riesce a vedere gli ologrammi non reali, dipende dal tipo di dispositivo. Dai primi sviluppi ad oggi sono molteplici i dispositivi creati, alcuni ad-hoc volti alla ricerca ed altri divenuti poi commerciali. R. Azuma, studioso che dedicò numerosi dei suoi lavori alla realtà aumentata, già citato precedentemente in questo elaborato, classificò i dispositivi nella seguente tassonomia[7]:

1. Head-Mounted-Displays (HMD)

Fanno parte di questa categoria quei dispositivi indossabili posizionati sulla testa, come ad esempio elmetti o caschetti. Sono dotati di schermi monoculari o binoculari, in base alla tecnologia, alla funzione svolta e al tipo di schermo, e consentono di posizionare gli ologrammi virtuali tra la vista dell'utente e il mondo reale. Altra classificazione interna a questa categoria è la possibilità di essere di tipo video o ottico, con i primi molto meno ergonomici per l'utente, a causa delle doppie telecamere posizionate sul dispositivo, che processano il mondo reale. Con questi dispositivi si ha la possibilità di avere entrambe le

mani libere di interagire con il mondo reale e/o con ologrammi, come Hololens 2, che appartiene a questa categoria.

2. Handheld displays

Questa categoria comprende tutti i dispositivi a schermo piatto, spesso di tipo LCD, dotati di almeno una camera. Questa tipologia prevede l'utilizzo di almeno una mano per poter orientare la camera verso la scena in realtà aumentata. Per poter usufruire di quest'ultima, l'utente deve guardare il display del dispositivo palmare, di piccole dimensioni, elemento negativo rispetto ai caschetti. A differenza dei primi però, la risoluzione su questi schermi è migliore, consentendo di vivere la realtà aumentata in modo più naturale e gli ologrammi sono renderizzati con maggiore qualità. Fanno parte di questa categoria dispositivi quali Tablet e Smartphone, i quali, grazie all'avanzamento tecnologico, consentono di supportare la realtà aumentata tramite potenti CPU, camere e sensori.

3. Projection displays

Fa parte di quest'ultima categoria tutto ciò che consente di proiettare l'informazione virtuale direttamente sulla scena fisica, come ad esempio i videoproiettori. La proiezione viene definita ologramma, ed è generata grazie alle luci proiettate sull'oggetto con particolari tipi di superfici che riflettono la luce. In questi casi la posizione della scena è fissa, dipendente dal proiettore, ed è l'utente che deve posizionarsi nella giusta locazione per poterla osservare, mantenendo libere le mani. Vantaggio di questa tecnologia è la possibilità di poter mostrare la realtà aumentata a più utenti in contemporanea, divenendo scalabile purchè essi siano presenti nella stessa stanza. Esempi di questo tipo possono essere osservati nei musei, università ed eventi.

4.4 Microsoft HoloLens 2



Figura 4.2: Microsoft HoloLens 2

HoloLens 2 è un dispositivo per la realtà mista sviluppato e prodotto da Microsoft[32]. E' il successore di HoloLens, con un miglioramento significativo delle specifiche hardware e software offerte. Una prima versione sviluppatori è stata resa disponibile all'inizio del 2019, mentre i primi dispositivi commerciali videro la luce solo a novembre dello stesso anno. A differenza del suo predecessore, HoloLens 2 presenta maggiore immersività, dovuta ad un maggiore campo visivo (da 34 gradi a 52), più ergonomia dovuti al nuovo design e al minor peso (appena 566g) e più orientato verso il business.

Il sistema operativo presente all'interno è Windows Holographic, una versione adattata di Windows 10, elemento che consente l'accesso a numerosi pacchetti di supporto Microsoft.

A supporto del sistema operativo vi è una CPU Qualcomm Snapdragon 850, una memoria RAM di tipo LPDDR4x da 4 GB, connettività Wi-Fi 802.11ac e Bluetooth. Per quanto concerne le restanti specifiche Hardware[33], possiamo individuare diversi elementi presenti nonostante le dimensioni ridotte. A livello sensoristico presenta quattro fotocamere di luce visibili per il tracciamento della testa, 2 interne per il tracciamento oculare, un sensore di profondità da 1 MP per il livello di nidificazione, una fotocamera generale da 8 MP con possibilità di video a 1080p30, e vari sensori quali giroscopio, accelerometro e magnetometro. E' altresì dotato di microfono e altoparlanti, utili nel caso di comunicazioni in tempo reale. La casa produttrice vanta fino a 2-3 ore di utilizzo attivo se alimentato a batteria, ma può essere utilizzato anche mentre collegato con cavo USB.

Sotto il profilo della funzionalità del dispositivo, è possibile osservare un grande

riconoscimento del fattore umano. E' presente infatti un tracciamento della mano a doppie mani interamente articolato, con possibilità di manipolazione diretta, senza controller. Ad ulteriore supporto, vi è il tracciamento oculare in tempo reale, utile nei casi in cui un operaio debba usare entrambe le mani per svolgere la sua attività. Il riconoscimento dell'ambiente è fondamentale, per questo Hololens 2 presenta un rilevamento su scala globale a 6 gradi di libertà, e un mapping spaziale in tempo reale: ad ogni frame, viene ricreata una mappatura 3D dell'ambiente circostante.

4.5 Analisi dei requisiti

I paragrafi precedenti hanno consentito di tracciare una linea guida per l'architettura del progetto, in cui la definizione del design ha tenuto conto degli avanzamenti tecnologici elencati finora, aggiungendo elementi innovativi.

Gli applicativi di manutenzione industriale in realtà aumentata da remoto analizzati prevedono una chiamata in tempo reale audio e video, la possibilità da parte dell'utente esperto di poter mostrare indicazioni visive e la possibilità, da parte di entrambi gli utenti, di poter accedere a documentazioni o risorse esterne per maggiori informazioni (ad esempio video, immagini, manuali caricati su un server esterno).

Nella progettazione di un'architettura, precedente allo sviluppo, questi elementi sono stati considerati come un'unità base da dover ricreare. Il lavoro di tesi, frutto di studio e ricerca, ha anche tenuto conto del valore aggiunto che quest'ultima deve produrre, con la presenza di elementi innovativi che vadano oltre le tecnologie già individuate.

In quest'ottica, lo studio è finalizzato a migliorare il modo in cui il tecnico esperto fornisce le informazioni: negli applicativi presi in analisi, la sua figura prevede l'uso di un programma in ambiente 2D, con la possibilità di creare elementi di indicazione (freccie, linee, cerchi, note testuali). L'obiettivo dello studio è stato di dare all'esperto, che fornisce assistenza da remoto, la possibilità di collaborare in una scena tridimensionale condivisa con il tecnico che deve svolgere l'operazione di manutenzione. All'interno di essa, l'esperto ha la possibilità di muoversi dentro lo spazio, e i suoi movimenti sono recepiti dall'altro utente attraverso un avatar 3D che lo identifica. I modelli virtuali del macchinario reale non sono semplici ologrammi intangibili, ed entrambi gli utenti, seppur con diverso sistema di input, possono interagire con essi. L'obiettivo finale della ricerca è quello di mostrare la procedura di manutenzione, ed uno spazio 3D condiviso permette di poterlo fare direttamente all'interno dell'ambiente virtuale, in quanto la realtà è osservata dal tecnico in loco tramite Hololens 2, e replicata in ambiente fisico. Sarà l'esperto, in questo caso, ad interagire con l'ambiente tridimensionale, mostrando la procedura da eseguire direttamente sul modello virtuale del macchinario, con il vantaggio di avere

maggior controllo da parte dell'utente esperto sulla procedura e di conseguenza un minor rischio di errori da parte del tecnico per la scelta dei componenti da assemblare.

I requisiti standard ed innovativi del progetto, alla luce delle analisi effettuate finora, possono essere riassunti negli elementi chiave:

1. Manutenzione effettuata tramite collaborazione da remoto
Presenza di chiamata audio e video. Possibilità di poter iniziare ed interrompere la chiamata da parte di entrambi gli utenti.
2. Scambio di dati in tempo reale
Al fine di fornire informazioni visive. Possibilità da parte di entrambi gli attori di poter caricare modelli 3D, e manipolarli per mostrare la procedura da eseguire in ambiente fisico.
3. Visualizzazione della documentazione cloud
Tramite database in server locale o online. Entrambi gli utenti, se connessi ad internet, hanno la possibilità di vedere singolarmente documentazione di tipo audio, video o testuale. La visualizzazione viene effettuata tramite apertura di finestra web.
4. Maggiore immersività
Presenza di avatar virtuale per ogni attore connesso. L'avatar segue i movimenti fisici, nel caso del tecnico con Hololens 2, e virtuali, nel caso di tecnico esperto da computer, in tempo reale. L'utente da Desktop, inoltre, sperimenta la sensazione di immersività utilizzando un applicativo sviluppato in ambiente interamente 3D, e muovendosi all'interno dello spazio virtuale in tutte le direzioni.

Capitolo 5

Le tecnologie

L'analisi dei requisiti, descritta nel capitolo precedente, ha fornito le basi per la definizione progettuale e lo sviluppo pratico dell'applicativo.

Nel capitolo che segue sono illustrati ulteriori elementi hardware aggiuntivi al dispositivo di realtà aumentata impiegato, coerentemente con il presentare tutto ciò che è stato utile ai fini dello sviluppo dell'applicativo. Per le caratteristiche da implementare a livello software, è stato effettuato uno studio dei programmi maggiormente utilizzati, con un confronto tra gli stessi alla ricerca di quelli che consentono di rispettare i requisiti e definizioni progettuali in maniera efficiente e facilmente utilizzabili. In particolare, a parità di potenzialità, si è preferito l'utilizzo di software libero, accessibile a tutti per eventuali sviluppi futuri. Altri parametri preferenziali sono stati: il numero di librerie e plug-in esterni disponibili, la possibilità di poter distribuire l'applicativo su più dispositivi e una comunità di base molto attiva, nell'eventualità di problemi incontrati durante la fase di sviluppo.

5.1 Hardware e Software

Per la realizzazione di un applicativo in realtà aumentata, primo elemento chiave è sicuramente l'hardware da utilizzare. La scelta dei software migliori, dei modelli e dell'interfaccia dipende fortemente dalle potenzialità dell'architettura fisica alla base. Le analisi e gli studi effettuati nei capitoli precedenti hanno portato all'utilizzo di HoloLens 2 come hardware finale per lo sviluppo della tesi. Questo caschetto, infatti, è uno degli ultimi realizzati tra i dispositivi disponibili per la realtà aumentata, frutto di anni di ricerca e sviluppo da parte di Microsoft. La componente innovativa, le potenzialità hardware pubblicizzate e la fama della casa di produzione hanno creato una grande comunità on-line molto attiva per la ricerca e sviluppo su questo dispositivo, fattore che ne ha influenzato la scelta finale. Inoltre, la possibilità di

poter sviluppare su un ambiente operativo Windows, offre una serie di strumenti e servizi in locale ed online unica e molto competitiva, con Microsoft stessa impegnata ad offrire manuali e guide che consentono di muovere i primi passi sul dispositivo anche per gli utenti più inesperti.

A livello software, è stato effettuato uno studio approfondito per la scelta del miglior ambiente di sviluppo nel caso di una applicazione di realtà aumentata per la manutenzione industriale, che rispettasse tutti i requisiti dell'architettura progettuale. Dalla documentazione ufficiale di Microsoft presente online[34], viene mostrato Visual Studio come strumento ideale per il debug e la distribuzione e DirectX, Unity o Unreal come ambienti per lo sviluppo applicativo. Tra questi tre software, la scelta finale è ricaduta su Unity. L'applicativo proposto come lavoro di tesi presenta un'interfaccia interamente tridimensionale, rappresentata da un mondo virtuale con degli elementi che possono muoversi all'interno dello spazio ed interagire in tempo reale con l'ambiente e gli attori presenti nella scena. L'impiego di applicativi basati su DirectX sarebbe stato molto complesso con un'architettura simile, mentre lo sviluppo su Unreal per Hololens 2 è ancora agli albori: è del 3 dicembre 2021, infatti, la notizia di Microsoft con l'apertura di strumenti di sviluppo con il software prodotto da EpiGames[35].

Oltre questi fattori, Unity offre una serie di API e plug-in gratuiti e di facile utilizzo. Uno di questi, fornito dalla stessa Microsoft, è stato impiegato nel progetto di tesi per la realizzazione delle schede interattive, per la gestione delle gesture e di altri strumenti di input e per la mappatura dello spazio con la gestione degli ologrammi. Vi sono poi altre librerie, sviluppate da aziende esterne e presentate in seguito all'interno di questo elaborato, che consentono un'interfaccia tra Unity e Server esterni o locali per la gestione della chiamata audio e video in tempo reale, e la gestione della scena interamente condivisa.

Successiva alla scelta dell'ambiente di sviluppo è stata la decisione sul miglior strumento per la realizzazione dei modelli tridimensionali, che compongono gli ologrammi presenti nella scena in realtà aumentata. Il caso d'uso, specificato con maggiori dettagli nei paragrafi successivi, ha visto l'impiego di più software dedicati alla computer grafica, alcuni dei quali imposti dai requisiti e dal materiale fornito. A seguire un excursus in merito ai software utilizzati per la modellazione 3D degli ologrammi, la realizzazione della scena virtuale, la distribuzione su Hololens 2 ed eventuale Hardware aggiuntivo impiegato durante lo sviluppo.

5.1.1 Blender

Blender è uno tra i software liberi più noti per quanto concerne la creazione di contenuti 3D completamente gratuito e in costante sviluppo. E' compatibile con quasi tutti i sistemi operativi, ed è possibile scaricare l'intero codice per aggiungere contenuti personalizzati quali plug-in, o installarli a partire da terze fonti. Gli altri

software esistenti che offrono strumenti simili sono: 3ds Max, Maya o Cinema 4D, ma la componente gratuita, la comunità ricca di sviluppatori, i numerosi pacchetti aggiuntivi scaricabili e la robustezza del programma hanno portato alla scelta di questo software come programma principale per la realizzazione della maggioranza degli ologrammi presenti nel progetto di tesi.

Esso offre un'ampia gamma di strumenti essenziali, tra cui Modellazione, Rendering, Animazione e Rigging, Texturing e molti tipi di simulazioni fisiche. Per il lavoro di tesi, sono state utilizzate le sezioni di modellazione, shading e texturing.

Con la modellazione è possibile costruire figure, oggetti e scenari. Essa può essere gestita in due modi: uno è di base, a livello geometrico, che lavora con figure primitive, estrusioni, scalamenti e rotazioni; l'altro opera tramite un metodo di scultura, risulta più naturale e consente la creazione di mesh altamente dettagliate, con diversi pennelli e metodi per modificare le trame.

Ad affiancare la modellazione sono presenti una serie di strumenti, che consentono di operare sulle mesh generate per modificarne le caratteristiche di superficie, di volume o di aspetto. Tra queste vi sono i modificatori, ovvero delle funzioni costituite da operazioni automatiche che influiscono su un oggetto in modo non distruttivo. Con i modificatori, è possibile eseguire automaticamente molti effetti che sarebbero molto lenti e meticolosi da effettuare manualmente (come la suddivisione della superficie, o la decimazione di vertici, utilizzati spesso in questo elaborato per la fase di creazione modelli).

Altro strumento utile presente all'interno è l' UV Unwrap, che consente di mappare una trama 2D sul modello su cui è applicato, fornendo colore alla superficie e maggiore somiglianza rispetto all'oggetto reale. Questo processo è definito "mappatura UV", in cui le superfici della mesh tridimensionale (svilupata lungo gli assi X , Y e Z) vengono distribuite in una immagine bidimensionale piatta (svilupata lungo gli assi U e V). I colori nell'immagine vengono quindi mappati sulla mesh e vengono visualizzati come colore delle facce della mesh. E' possibile caricare qualsiasi tipo di texture personale, creando modelli 3D più realistici.

Non appena viene aperto il programma è possibile osservare un'interfaccia composta da diverse aree, ciascuna delle quali contiene un Editor. Le aree dell'interfaccia predefinita sono cinque: Una contenente l' Info Editor, nella parte superiore della schermata, una di 3D View, situata nella parte centrale, una Timeline, posizionata nella parte inferiore, un Outliner nella parte superiore destra ed infine un Properties Editor nella parte in basso a destra della schermata.

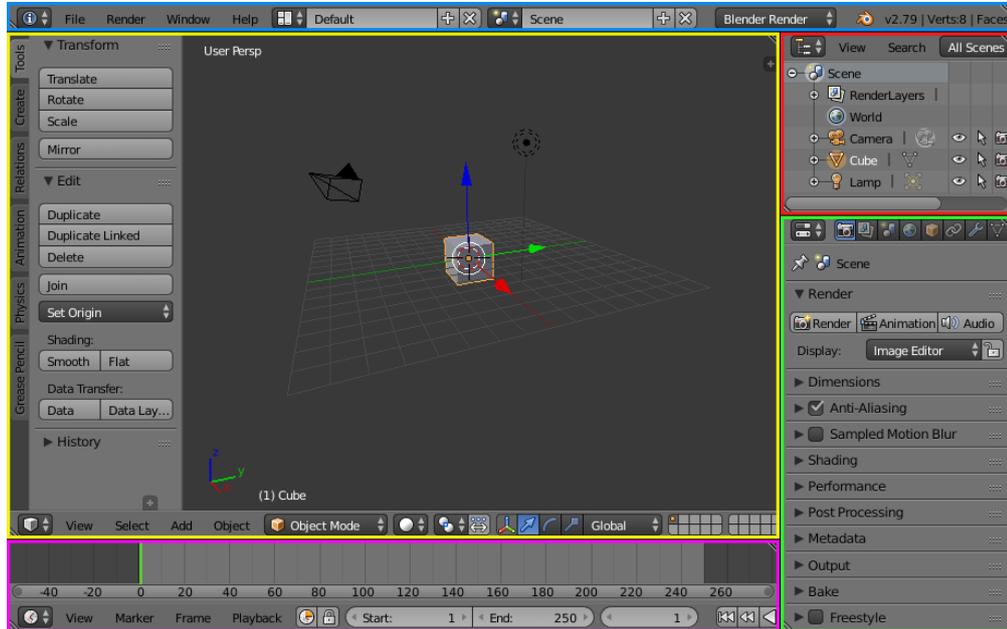


Figura 5.1: Schermata di Default di Blender

Per poter lavorare al meglio sui modelli, Blender offre diverse modalità di visualizzazione per l'area di lavoro in cui si trovano gli oggetti modellati. Quelle maggiormente utilizzate per lo sviluppo di questo applicativo sono:

- **Wireframe:** Mostra l'intera scena visualizzando solo i lati degli oggetti.
- **Solid:** E' la modalità standard di Blender, in cui viene visualizzata la mesh con tutte le superfici visibili, senza materiali o texture applicate.
- **Material preview:** Questa modalità è particolarmente adatta per visualizzare in anteprima materiali e texture, con un controllo aggiuntivo per selezionare diverse condizioni di illuminazione.
- **Rendered preview:** E' la modalità con cui è possibile avere un anteprima della scena renderizzata, utilizzando il motore di rendering selezionato. Tiene conto delle luci e delle opzioni di ambiente.

In aggiunta, per poter lavorare sui modelli, sono state sviluppate cinque modalità di lavoro principali, ma solo due di esse si sono rivelate utili ai fini del progetto di tesi:

- **Object mode:** Questa modalità è quella di default, selezionata automaticamente all'apertura di Blender. Quando si effettua una selezione in Object mode, viene selezionata l'intera Mesh, che è possibile scalare, ruotare, traslare nella sua interezza.
- **Edit mode:** Con questa modalità è possibile selezionare e modificare i singoli elementi della geometria che compongono una Mesh: Vertici, Lati e Facce. Per definizione, un Vertice è un punto in cui due o più angoli si incontrano (ad esempio, su un cubo, è il punto ad angolo di ogni cubo). Un Lato è composto da due Vertici. Una Faccia è composta da tre o più Lati.

5.1.2 SolidWorks

SolidWorks è un programma per computer CAD (Computer Aided Design) e CAE (Computer Aided Engineering) per la modellazione 3D sviluppato da J. Hirschtick e acquistato nel 1997 dall'azienda Dassault Systèmes, funzionante principalmente su sistemi Microsoft Windows. Il programma comprende una serie di strumenti che possono essere utilizzati sia per la progettazione 2D sia 3D. Con questo software è inoltre possibile creare interi sistemi meccatronici, includendo anche una componente di simulazione per poter testare virtualmente quanto progettato. Per tale motivo e per la forte componente matematica, è più frequentemente utilizzato da ingegneri meccanici, elettrici ed elettronici per la costruzione di progetti composti, più che da artisti.

Con SolidWorks è possibile seguire un progetto in tutte le sue fasi: la prima, iniziale, consente la pianificazione, l'ideazione visiva e la valutazione della fattibilità del modello; la seconda include la possibilità di progettare e costruire elementi meccanici o elettrici. La terza fase è quella di testing, tramite simulazioni che comprovino la corretta esecuzione delle precedenti fasi ed ha come obiettivo quello di prevedere il comportamento fisico di un prodotto nel mondo reale, agendo virtualmente sui modelli CAD; un' ultima fase aggiunta, prevede che il software possa essere usato per la gestione sia analitica che di automazione o riguardante i servizi cloud.

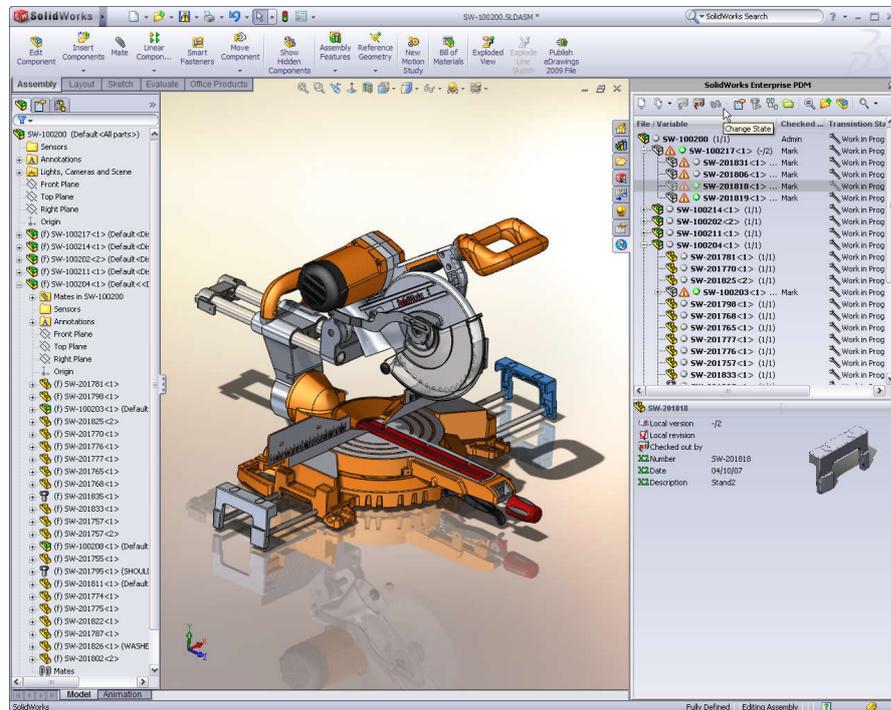


Figura 5.2: Schermata di Default di SolidWorks

Tramite la schermata di default presentata nell'immagine sopra è possibile avere il controllo dell'intera scena centrale ed accedere a numerosi strumenti ed operazioni automatiche che facilitano la progettazione e lo sviluppo. L'idea principale di Solidworks è che l'utente crei disegni, detti Sketch, in 2D che vadano poi a comporre la struttura di base per l'estrusione e realizzazione del modello in 3D, definito Parte. Da questo solido l'utente può scegliere se assemblarlo ad altre parti o posizionarlo direttamente sulla propria scena finale. Creare lo Sketch è semplice ed intuitivo, è sufficiente infatti trascinare una riga lungo il piano 2D, ed è possibile selezionarne la lunghezza nell'unità di misura desiderata. Una volta estruso uno Sketch ed ottenuta una Parte, è possibile selezionare una delle facce ottenute per posizionare su di essa un nuovo Sketch, ampliando così il modello 3D e modificandone la geometria.

Altro strumento utilizzato è la modifica componente, che consente di applicare fori o tagli all'interno della geometria creata, utile nel caso di progettazione di componenti con inserimento di viti, guaine e tubi.

Poichè nel caso d'uso individuato per il progetto di tesi sono stati forniti disegni tecnici del modello reale da replicare virtualmente, l'utilizzo di questo software per

la creazione 3D si è rivelato fondamentale, ed è stato scelto rispetto ad altri CAD per la sua semplicità di utilizzo ai non esperti. Con esso è stato possibile tradurre i disegni 2D di numerose componenti del modello generale nella loro esatta replica digitale.

5.1.3 Unity

Unity è un motore per la creazione di giochi prodotto da Unity Technologies, nel 2005. L'obiettivo principale del software è lo sviluppo di videogiochi in 3D o 2D, ma può essere utilizzato anche per la creazione di contenuti interattivi di ambito diverso da quello videoludico. Uno dei maggiori vantaggi nell'utilizzo di questa tecnologia è la possibilità di poter programmare su un unico codice e poterlo rilasciare come applicativo su numerosi sistemi diversi tra Android, PC, iOS e Windows.

Oltre alla possibilità di sviluppo multiplatforma, vi sono altri elementi che hanno portato alla scelta di Unity come motore principale dell'applicativo progetto di tesi. Il software è infatti completamente gratuito per progetti personali, con una comunità di sviluppatori molto ampia dovuta al largo utilizzo e agli anni di rilascio. La casa madre stessa inoltre fornisce numerose risorse e strumenti per lo sviluppo, da assets gratuiti a documentazione chiara ed aggiornata. I plug-in e le librerie possono essere rilasciati da utenti o aziende terze, per creare ponti di compatibilità tra applicativi diversi ed aumentare gli ambiti di sviluppo per la piattaforma. Per lo sviluppo del progetto è stata utilizzata la versione **2019.4.12f1**, con un'interfaccia che, all'apertura, si presenta come da immagine sottostante.

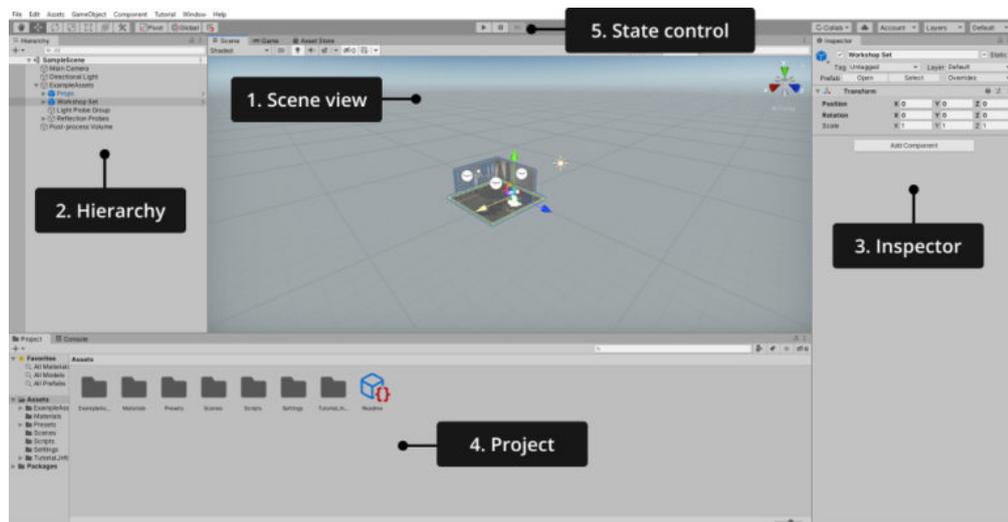


Figura 5.3: Interfaccia di Unity

La schermata di default, interamente personalizzabile, può essere divisa in sei aree principali:

- **Scene view:** Posizionata nella parte centrale dello schermo, consente di visualizzare, selezionare e manipolare gli oggetti, definiti Gameobject in Unity, all'interno della scena 3D.
- **Hierarchy:** Collocata nella parte sinistra della schermata, mostra un elenco di tutti gli oggetti presenti all'interno della scena.
- **Inspector:** Posto nella parte laterale destra, consente una visualizzazione dettagliata delle proprietà, dei parametri e delle componenti dell'oggetto selezionato.
- **Project:** Posizionata nella parte inferiore dello schermo, fornisce una visualizzazione di tutte le risorse presenti nella cartella del progetto.
- **State controls:** Si identifica con tre pulsanti collocati nella parte superiore dello schermo, e tramite essi è possibile avviare e interrompere la simulazione di gioco.
- **Game view:** Situata spesso come finestra accanto a quella dedicata al progetto, questa scheda si attiva quando viene eseguita la simulazione, fornendo una vista di gioco.

Per lo sviluppo del progetto la schermata di Hierarchy è stata popolata da gameobject di vario tipo, utili sia come assets di scena che come oggetti invisibili volti alla gestione della connessione in rete, degli input da tastiera e da Hololens e per la struttura generale del progetto.

Per quanto riguarda gli assets, si è rivelato molto utile il concetto di nidificazione: è infatti possibile imparentare più oggetti tra loro, creando strutture complesse in cui oggetti figli dipendono da oggetti padri. In questo modo, ogni operazione base, quale traslazione, rotazione o scalamento effettuata sull'asset genitore, verrà estesa a tutti gli asset all'interno della gerarchia.

Altro concetto utile per lo sviluppo è quello di Prefab che è un componente speciale che consente di salvare un oggetto di tipo Gameobject nella sua interezza all'interno del progetto. Nel momento in cui un oggetto diventa un Prefab, è indicato in blu nell'area di Hierarchy, e l'asset viene salvato nelle cartelle interne del progetto. In questo modo è possibile riutilizzarlo ed instanziarlo più volte con le stesse componenti, sia nella singola scena che in scene diverse, e non prevede una nuova configurazione.

All'interno dell'Inspector, come detto precedentemente, è possibile trovare informazioni dettagliate sull'oggetto selezionato. Se l'oggetto è presente nella Hierarchy,

sono mostrati i suoi attributi di trasformazione, di mesh e materiali (se presenti) e una serie di elementi chiave detti componenti. I componenti ampliano le proprietà dell'asset, aggiungendo proprietà o modificandole. Ad esempio, se viene istanziato un oggetto di gioco vuoto, e su di esso vengono aggiunti i giusti componenti, è possibile trasformarlo in una camera, una luce o associargli funzioni personalizzate tramite script. Tramite questo pannello infatti è possibile utilizzare dei componenti forniti da Unity stesso, sviluppati da altri creatori o programmati da zero in linguaggio *C#*, aggiungendo un componente di tipo script all'asset.

5.1.4 Visual Studio

L'uso di Visual studio all'interno del progetto di tesi è consigliato dalla stessa casa produttrice del dispositivo di realtà aumentata utilizzato, Hololens 2. Come citato precedentemente, Microsoft indica Visual Studio come piattaforma ideale per la creazione e compilazione su di esso, consentendo di tradurre una build realizzata in Unity in un applicativo eseguibile su tutti i sistemi Windows.

Visual Studio è un IDE (Integrated Development Environment) sviluppato da Microsoft per la creazione di applicazioni di vario tipo, dal Web, mobile, cloud e servizi terzi. E' possibile creare o gestire codice nativo o importato da altri applicativi quali Unity, usare librerie predefinite o personali, e scrivere in 36 linguaggi tra *C#*, linguaggio di programmazione principale del progetto, ad altri linguaggi quali *C++*, *Python*, *Javascript* etc. Il supporto è previsto sia per sistemi Windows che Mac.

La prima versione di Visual Studio fu pubblicata nel 1997. Da allora, sono state rilasciate numerose versioni, con cadenza biennale e 3 edizioni diverse. Quella che è stata utilizzata per lo sviluppo del progetto è l'edizione Community, l'unica gratuita per progetti personali, rilasciata dal 2014. La versione di Visual Studio utilizzata, la 2019, presenta la seguente interfaccia:

E' possibile osservare come essa sia composta da diverse aree, ognuna delle quali contenente più sezioni e strumenti diversi per la navigazione e la programmazione. In particolare, le aree dell'interfaccia di default sono quattro:

- **Code Editor:** Rappresenta la schermata centrale, dove l'utente scrive il codice.
- **Output Window:** Schermata che si trova nella parte inferiore dell'applicativo. Al suo interno, Visual Studio mostra gli output, gli avvisi del compilatore, i messaggi di errore e le informazioni di debug.
- **Solution Explorer:** Questa schermata, situata a sinistra o destra dell'interfaccia, consente all'utente di vedere l'intera gerarchia di file del progetto a cui sta attualmente lavorando.

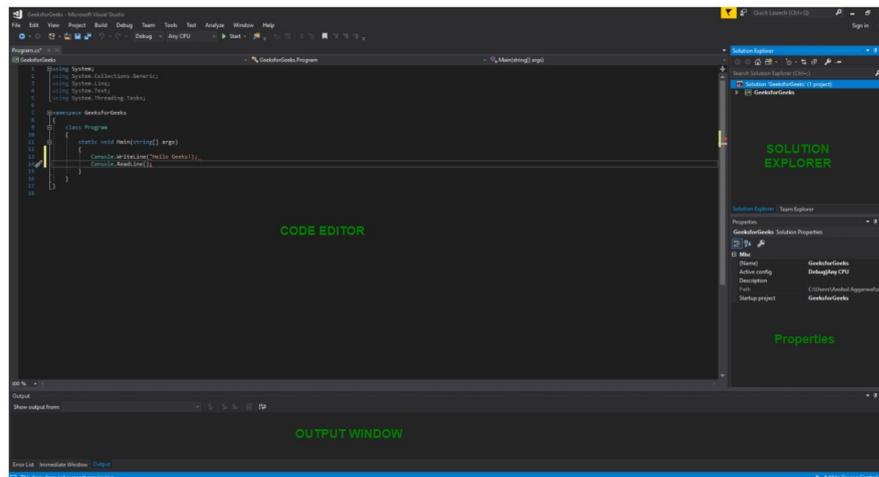


Figura 5.4: Interfaccia di Visual Studio

- **Properties:** In genere posizionata sotto l'area precedente, essa fornisce informazioni aggiuntive sulle parti selezionate del progetto corrente.

Nella parte superiore dell'interfaccia si trovano i menù, contenenti diverse opzioni per lo sviluppo del progetto. Tra questi vi è la toolbar, al cui interno sono contenuti i comandi più utilizzati, tra qui quelli utili alla distribuzione e debug.

Per il progetto di tesi, Visual Studio è stato utilizzato per la creazione di script in linguaggio *C#* da importare all'interno di Unity per la corretta gestione di tutte le funzionalità presenti all'interno della scena, e per la distribuzione finale dell'applicativo. Per poter distribuire un progetto su HoloLens 2, è stato necessario applicare le corrette impostazioni sia su Unity per la creazione della build che su Visual Studio per la distribuzione. In particolare, la build che viene aperta su Visual Studio presenta la seguente impostazione in Unity:

- Target device impostato HoloLens
- Architecture impostata su ARM 64
- Build Type impostata su D3D Project
- Target SDK Version impostato su Latest Installed
- Minimum Platform Version impostato su 10.0.10240.0 (non sono stati effettuati test su altre versioni)
- Visual Studio Version impostato su Latest installed

- Build and Run impostato su USB Device, per poter effettuare la distribuzione tramite cavo USB collegato ad Hololens 2
- Build configuration impostato su Release

Dopo aver effettuato la build verrà creata una cartella contenente tutti i file relativi, tra cui un progetto in Visual Studio.

Per poter eseguire la distribuzione è necessario avere il dispositivo Hololens 2 collegato al computer tramite cavo, con la modalità sviluppatore abilitata dalle impostazioni interne al caschetto.

Con Visual Studio aperto e le precedenti operazioni effettuate, la distribuzione avviene selezionando nei due menù a tendina della toolbar la versione "Release" o "Master" per la compilazione ed "ARM64" come architettura. Terminata la distribuzione, se questa è avvenuta con successo, verrà creata una nuova icona corrispondente all'applicativo nel menù di Windows del caschetto, pronta ad essere utilizzata.

5.1.5 EinScan-SP 3D scanner

Il progetto di tesi ha visto l'utilizzo di uno scanner 3D portatile, e del relativo software dedicato, per la scansione di alcune componenti meccaniche del caso d'uso. L'utilizzo dei Software di modellazione 3D precedentemente spiegati consentono di replicare, a partire da disegni tecnici o immagini, oggetti del mondo reale. Con l'utilizzo di uno scanner 3D si ha il vantaggio di generare una nuvola di punti virtuali a partire direttamente dall'oggetto fisico, con un livello di dettaglio dell'ordine di micron e a scala reale, ottenendo maggiore realismo. La semplicità di utilizzo, la portabilità (appena 4.2kg di peso) e la velocità di scansione hanno portato alla scelta di questa tecnologia.

L'EinScan-SP è uno scanner 3D per computer Desktop prodotto dalla compagnia cinese Shining 3D. Fondata nel 2004, l'azienda rappresenta oggi uno tra i migliori produttori di scanner 3D sul mercato, offrendo un'ampia gamma di dispositivi, adatti sia per le aziende che per uso privato. Lo scanner utilizzato è stato lanciato nel 2017, con campi applicativi che variano dalla progettazione di prodotto, al reverse engineering o a conservazione di beni culturali. Risulta quindi un dispositivo versatile, in grado di catturare la geometria di oggetti di piccole e medie dimensioni e di tramutarla in modello tridimensionale.



Figura 5.5: Eiscan-SP con tutte le componenti

A livello di Hardware, esso si compone di uno scanner a luce bianca da 1.3 Mpx, una tavola in vetro per la calibrazione ed un disco girevole con dei marker posti nella parte superiore, per consentire una scansione a 360°. Qualora non si voglia eseguire una scansione di questo tipo, viene fornito un treppiedi per poter posizionare lo scanner autonomamente, utile nel caso di oggetti di dimensioni maggiori a quelle del disco girevole. Per poter funzionare, lo scanner deve essere collegato tramite cavo USB ad un computer Desktop con il relativo software dedicato, Exscan attraverso cui è possibile gestire le singole scansioni: ogni scansione può essere eliminata, salvata o modificata, eliminando, ad esempio, nuvole di punti in eccesso. Inoltre, più scansioni dello stesso oggetto vengono allineate automaticamente o manualmente via software, consentendo la scansione a tutto tondo. Dopo aver effettuato le scansioni ed averle allineate, l'applicativo offre degli strumenti per migliorare ulteriormente la forma della mesh, tra cui, ad esempio, la possibilità di riempire eventuali buchi tracciati dalla scansione, o dare un aspetto più morbido o duro agli angoli delle superfici.

Le caratteristiche ufficiali dello scanner 3D sono le seguenti:

- Scansioni tramite treppiedi e marker adesivi da applicare sull'oggetto, o tramite piano girevole con marker alla base.
- Scanner a luce bianca, non laser, pertanto più sicuro e accessibile

- Calibrazione automatica
- 4 secondi per una singola scansione
- 1 minuto per una scansione a 360°
- Due modalità di scan: fissa ed automatica (sul piano girevole)
- Vasto scan range, da piccoli oggetti ai più grandi
- Scansioni ad alta risoluzione, con precisione di 0,05 mm.
- Exscan software fornito gratuitamente per la gestione delle scansioni

5.2 Le librerie

Tra le scelte chiave che hanno portato alla preferenza di alcuni Software ed Hardware a discapito di altri nello sviluppo progettuale, grande importanza ha ricoperto la flessibilità e qualità dei metodi messi a disposizione dalle API base fornite, inteso come facilità di creare maggiore interoperabilità tra applicazioni diverse, nonché la possibilità di poter essere personalizzate ed ampliate. Le API utilizzate hanno consentito di creare canali di comunicazione in Unity per la gestione degli oggetti condivisi, degli input, della scena in realtà aumentata e per la gestione della chiamata audio e video in tempo reale.

5.2.1 MRTK

Mixed Reality Toolkit per Unity è un kit di sviluppo multipiattaforma open source per applicazioni di realtà mista. Esso fornisce un sistema di input utilizzabile su sistemi diversi, alcune componenti fondamentali e blocchi comuni per le interazioni spaziali. L'obiettivo principale di MRTK è facilitare e velocizzare la creazione di applicazioni in realtà mista, accelerandone la distribuzione su più piattaforme dallo stesso progetto Unity. Può essere utilizzato da programmatori con diverso grado di esperienza: il principiante con poca esperienza di programmazione, a cui sono forniti strumenti già pronti per l'utilizzo; l'utente intermedio, che ha la possibilità di partire dagli strumenti base per modificarli secondo le sue esigenze; l'utente esperto, che può espandere le librerie pre-esistenti aggiungendo nuovi contenuti. A prescindere dal livello di esperienza, tutti sono in grado di beneficiare dell'affidabilità della struttura alla base.

La creazione del kit è stata guidata dalla stessa casa produttrice di Hololens 2, Microsoft, che ha inserito all'interno del pacchetto di installazione della libreria numerosi esempi, assets e componenti pronti per l'utilizzo con il caschetto per la realtà aumentata, oltre che fornire una serie di tutorials e documentazione online

per una facile introduzione allo sviluppo.

Per poter installare il kit di MRTK è stato utilizzato un software per l'installazione, Mixed Reality Feature Tool, che consente di selezionare le API divise per categoria ed area di sviluppo, o scaricare estensioni ed esempi vari.

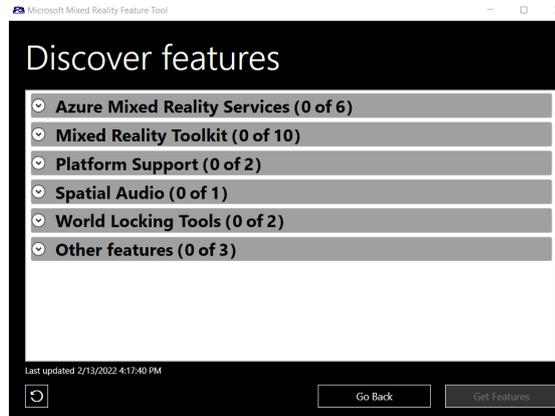


Figura 5.6: I pacchetti MRTK disponibili con Mixed Reality Feature Tool e non solo

In Fig.5.6 è presentato il software Mixed Reality Feature Tool utilizzato per scaricare le API all'interno del progetto di tesi. Tra queste, sono state inserite tutte quelle presenti all'interno della sezione Mixed Reality Toolkit, che contengono la gestione delle interazioni, degli input, dei microfoni e altri elementi quali esempi, assets, utilità e componenti opzionali.

Pur non facente parte del pacchetto MRKT, sono stati fondamentali i kit dedicati allo Spatial Audio e a WebRTC, discusso in seguito.

5.2.2 WebRTC

MixedReality-WebRTC è una raccolta di librerie che fornisce supporto agli sviluppatori di applicativi in realtà mista per integrare la comunicazione audio e video peer-to-peer in tempo reale, fornendo stabilità e migliorando l'esperienza collaborativa. Il kit utilizzato è una versione ottimizzata per la distribuzione su dispositivi di realtà mista, tra cui HoloLens 2, e si basa sul kit WebRTC. Si tratta di una tecnologia sviluppata nel 2011, interamente open source e gratuita, che fornisce a browser Web o applicazioni mobili la possibilità di comunicazione audio e video in tempo reale tramite API. Viene applicata per la sua semplicità di installazione ed utilizzo, che non richiede plug-in particolari e si adatta a dispositivi multiplatforma.

Per quanto concerne la sua versione operante su dispositivi Universal Windows Platform (UWP) come HoloLens 1 o 2, essa consente di catturare il video in output

dallo streaming della camera frontale (o la camera della scena di gioco), e l'audio del microfono locale, per comprimerli ed inviarli attraverso Unity al peer in ascolto sull'indirizzo IP impostato come server. Per gli utenti più esperti, è possibile catturare i file mediali prima del loro invio, per migliorarne la qualità o inserire elementi personalizzati. E' altresì possibile ricevere video ed audio da parte di altri utenti, e il rendering del flusso di chiamata viene gestito dalla stessa libreria, che si occupa di tradurlo in Texture di Unity. Applicando la Texture ad un pannello 2D o un qualsiasi asset tridimensionale, è possibile visionare il video ricevuto da remoto, incluso di audio se si collega anche la componente inerente.

5.2.3 PUN2

Photon Unity Networking 2 (PUN2) è un pacchetto Unity per i giochi multiplayer in tempo reale, prodotto dall'azienda di sviluppo software Photon. Seppur esso trovi maggior impiego in ambito videoludico, le sue librerie sono state utilizzate per la gestione degli ologrammi condivisi all'interno della scena, e per sincronizzare le posizioni degli avatar 3D corrispondenti agli utenti, in tempo reale. Pertanto, ogni utente che accede ai server dedicati viene instaziato come giocatore in scene personalizzate denominate lobby, all'interno delle quali gli oggetti possono o meno essere sincronizzati sulla rete.

Esistono diversi plug-in simili su Unity, ma è stato scelto PUN2 perché è la piattaforma più robusta, veloce, gratuita e con il codice completo disponibile, per la creazione di applicativi personalizzati. Inoltre, tramite PUN2 è possibile entrare nelle lobby da piattaforme diverse, purchè supportate da Unity.

Il pacchetto utilizzato si compone di tre livelli di API:

Al livello più alto vi è il puro codice PUN2, che implementa funzionalità specifiche di Unity come oggetti di rete, RPC etc.. Il secondo livello contiene la logica per lavorare con i server Photon, gestire gli ingressi alle lobby e le callbacks. E' in questo livello che viene gestita la logica in tempo reale. Il livello più basso è costituito da file di libreria DLL, che contengono elementi come la deserializzazione e protocolli vari.

Per poter accedere al server principale, e creare delle lobby personali, è necessario creare un account gratuito sul sito di Photon tramite browser. Una volta creato il profilo, nelle impostazioni interne è possibile gestire i flussi di accesso e le proprietà della stanza (o più stanze) create, o effettuare attività di monitoraggio aggiornate in tempo reale sul numero di utenti collegati.

Le caratteristiche principali di PUN2, evidenziate sulla documentazione online pubblicata dalla compagnia, sono le seguenti:

- **Struttura dell' API**, molto semplice ed intuitiva
- **Tutorials rilasciati dalla casa madre**, disponibili sul sito ufficiale

- **Server centrale**, come servizio in hosting
- **Servers dedicati**, per poter creare stanze ad accesso esclusivo
- **Modalità offline**, per l'utilizzo del plugin anche in assenza di connessione

Capitolo 6

Sviluppo di un'applicazione in realtà aumentata per la manutenzione industriale da remoto

6.1 Architettura del progetto

Dopo aver definito, nei capitoli precedenti, i requisiti standard forniti da applicazioni commerciali attualmente in utilizzo, aver trovato gli elementi innovativi per l'elaborato ed effettuato un'analisi sui dispositivi hardware e software migliori per il rispetto dei punti chiave, in questo capitolo si illustra lo sviluppo pratico dell'applicativo.

Sarà introdotto il modo in cui i vari software ed hardware del capitolo precedente sono stati utilizzati e come sono stati combinati fra loro per offrire un'esperienza modulare, stabile, interattiva ed in realtà aumentata.

L'architettura finale dell'applicativo oggetto di tesi, a conclusione della fase analitica, è mostrata in Fig.6.1:

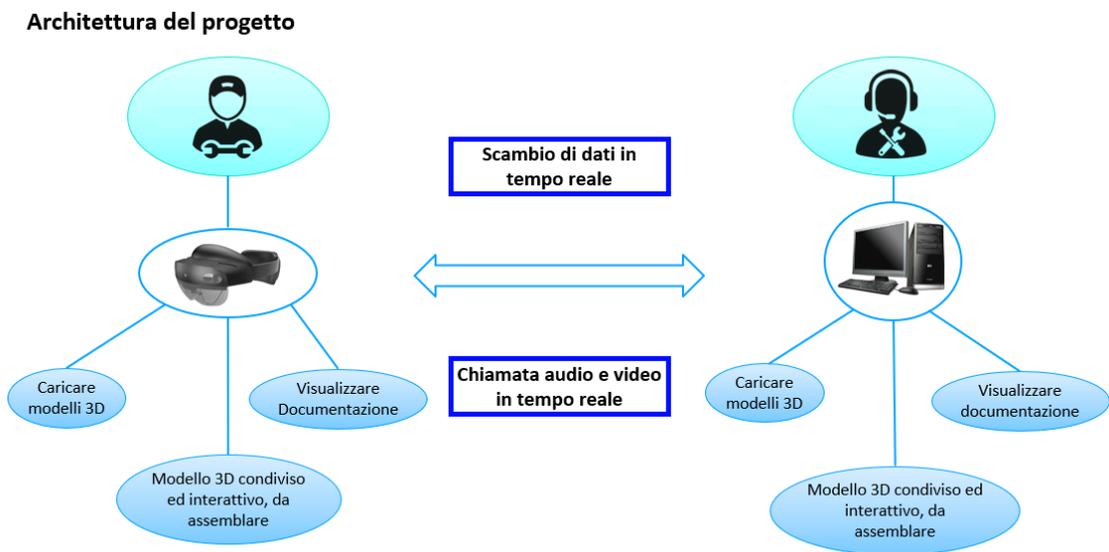


Figura 6.1: Design dell'applicativo

Come è possibile osservare, l'architettura finale prevede l'impiego di due operatori: il tecnico in loco, che indossa il dispositivo per la realtà aumentata Hololens 2, l'utilizzatore, l'esperto da remoto, utilizzerà l'applicativo tramite computer Desktop. Nella figura è possibile osservare, nei riquadri evidenziati in blu, le basi dell'architettura, ovvero la possibilità di scambiare i dati relativi alla posizione degli oggetti in tempo reale, l'istanziamento o distruzione di nuovi, e la chiamata audio e video. Per quanto riguarda le funzionalità finali offerte dall'applicazione, queste sono presentate in figura nell'area sottostante ad ogni dispositivo. E' possibile osservare come si sia garantito, per entrambi gli utenti, l'utilizzo delle stesse funzionalità,

sebbene erogate in maniera diversa a causa del diverso sistema di input (mani per Hololens 2, tastiera e mouse per Desktop).

6.2 Sviluppo delle componenti

Per facilitare la creazione dell'applicativo, sono state individuate cinque fasi diverse nello sviluppo, corrispondenti a cinque moduli scomposti in grado di soddisfare tutti i requisiti. La composizione del progetto, seguendo le varie fasi, ha consentito di programmare modularmente, facendo sì che alcune funzionalità potessero funzionare singolarmente e che il sistema risultasse più robusto. Si è posta attenzione alle seguenti funzioni in particolare:

- **Chiamata audio e video**
- **Manipolazione condivisa del modello**
- **Visualizzazione della documentazione nella UI**

Nonostante tutte e tre richiedano una connessione ad internet di base, sono da considerarsi indipendenti tra loro: la chiamata audio e video, ad esempio, non è indispensabile per poter visionare il modello dell'elettromandrino o provare ad assemblarlo autonomamente; se vi fosse una chiamata attiva e questa, per errore, si interrompesse, i due utenti sarebbero comunque in grado di osservare i movimenti altrui sul modello 3D, mediante una connessione internet presente. Viceversa, qualora il tecnico in loco fosse inesperto nell'interazione con i modelli in realtà aumentata, potrebbe comunque utilizzare il dispositivo Hololens 2 come strumento per la chiamata audio e video, sarebbe guidato solo tramite voce, sfruttando la possibilità di avere entrambe le mani libere. Ultima funzione resa indipendente, per entrambi gli utenti, è la possibilità di visionare una documentazione online. Nel caso di Hololens in particolare, in questo caso, si avrebbe la possibilità di visionare manuali, video ed immagini direttamente sul luogo della riparazione.

In seguito sono presentate le cinque fasi, introdotte all'inizio del paragrafo, che sono state seguite per la realizzazione dell'applicativo generale.

6.2.1 Ricerca del caso d'uso

La scelta del caso d'uso ha previsto la ricerca di un modello fisico esistente, utilizzato preferibilmente in ambito industriale, di dimensioni non eccessive per poter visionare al meglio tutte le funzioni possibili, dall'assemblaggio virtuale alla semplice istanziazione del modello 3D. La scelta finale, in collaborazione con il CIM e uno dei suoi partner, SKF, è ricaduta su un elettromandrino modello ELM GMN

HSX 150-3000023.

L'azienda SKF, con sede ad Airasca (TO), effettua regolarmente la manutenzione di elettromandri di vario tipo e dimensione, al cui interno sono presenti cuscinetti prodotti dalla stessa azienda. Nel caso d'uso indicato, in particolare, sono presenti i cuscinetti modello W 6008/6011-2RS1.

Come ogni macchina industriale, l'elettromandrino è soggetto a difetti o usura che possono portare ad un calo delle prestazioni nel funzionamento, ragion per cui è indispensabile una revisione e manutenzione preventiva che estenda la durata di esercizio. Tra le varie cause che portano a malfunzionamenti, vi sono deformazioni da urto, sovraccarichi, problemi di lubrificazione, ingresso di refrigerante o altri agenti contaminanti all'interno, normale usura da fatica o riparazioni non idonee [36]. Queste cause possono portare a danneggiare il mandrino e le sue componenti interne, quali ad esempio il danneggiamento dei cuscinetti, errori nello statore, errori di allineamento o malfunzionamento del sistema di bloccaggio. L'operazione di revisione ed eventuale manutenzione prevede, all'interno della procedura totale, il disassemblaggio dell'elettromandrino, l'analisi con possibile sostituzione delle componenti, la lubrificazione e il suo corretto assemblaggio.

Come si evince, il tipo di procedura da eseguire è molto complessa, per tale motivo è preferibile avvalersi di figure altamente specializzate, c.d. mandrinisti, che si occupano di eseguirla quotidianamente su tutte le tipologie di elettromandri. La difficoltà e precisione della procedura, l'elevato numero di componenti presenti all'interno e la sua dimensione ridotta hanno portato alla scelta di questo macchinario come caso d'uso finale.



Figura 6.2: Un esempio di elettromandrino marca GMN



Figura 6.3: Un cuscinetto prodotto da SKF

6.2.2 Creazione del modello 3D

Dopo aver trovato il caso d'uso, per poter rispettare il design dell'architettura progettuale indicata in Fig.6.1 è stato necessario creare il modello 3D corrispondente esattamente al modello fisico indicato al paragrafo precedente. La sua creazione ha previsto l'impiego di diversi software, indicati nel capitolo quinto di questo elaborato, ed è stata richiesta all'azienda tutta la documentazione possibile, non disponendo di un modello 3D CAD del macchinario. Tra gli elementi forniti vi sono alcuni disegni tecnici delle varie componenti, la visione reale degli stessi effettuata presso lo stabilimento di Airasca, l'aggiunta di foto e video della procedura da eseguire, manuali in formato cartaceo e digitale contenenti la struttura del macchinario nel dettaglio e i passaggi da eseguire per una corretta esecuzione del disassemblaggio.

Al termine della fase di raccolta, sono stati individuati circa 23 componenti fondamentali dei pezzi che compongono l'elettromandrino, ad esclusione di ulteriori pezzi secondari quali viti, guaine e bulloni(unificati in singole componenti, per velocizzare l'esecuzione della procedura virtuale).

Le fotografie e la visione dei pezzi sono stati elementi indispensabili per realizzare i modelli su Blender: a partire da una forma cilindrica di base, fornita dal software stesso, si sono ottenuti modelli verosimili in 3D applicando su di essi estrusioni, scalamenti e diversi modificatori. Laddove sono stati forniti disegni tecnici delle componenti, si è preferito lavorare sul software SolidWorks, riuscendo ad ottenere dei modelli molto più precisi in termini di dimensioni millimetriche e con maggiore attenzione ai dettagli, grazie alla possibilità di poter utilizzare come "bozza" di lavoro di base lo stesso disegno tecnico fornito. Una volta ricalcata la pianta di base del disegno 2D, è stato possibile ottenere l'esatto modello 3D estrudendo i lati e applicando fori nelle sezioni di vuoto, oltre a smussare i bordi nel caso di aree con inserimento di viti o a giunzione con altre componenti. Per altre componenti infine, è stato possibile utilizzare lo scanner 3D Eiscan-SP, così da ottenere dei modelli 3D a partire direttamente dalle componenti reali. Per poter ottenere questi modelli sono state effettuate le scansioni all'interno dello stabilimento, sfruttando lo scanner portatile, e ponendo sul disco rotante delle componenti di piccole dimensioni, non molto pesanti, come quello presentato in Fig. 6.4. Una problematica riscontrata sin da subito è inerente al tipo di scanner utilizzato, a luce bianca: questa tipologia, sebbene molto più economica delle altre, non è ideale per oggetti metallici, poichè riflette la luce e non vengono catturate le informazioni di profondità per la costruzione della nuvola di punti, ottenendo una scansione vuota. Per ovviare a questo problema, sono stati utilizzati degli spray appositivi di tipo opacizzante che rivestono l'oggetto con una patina esterna colorata di bianco. Dopo aver applicato lo spray su ogni parte della superficie, e aver atteso pochi minuti affinché risultasse opaca in ogni sua parte, sono state ottenute delle scansioni ottimali. La somma di

più scansioni, ponendo la componente in posizioni diverse, e le successive opzioni fornite dal software per riempire i buchi di scan o smussare i contorni, hanno permesso di ottenere delle componenti pronte all'utilizzo, come mostrato in Fig. 6.4.

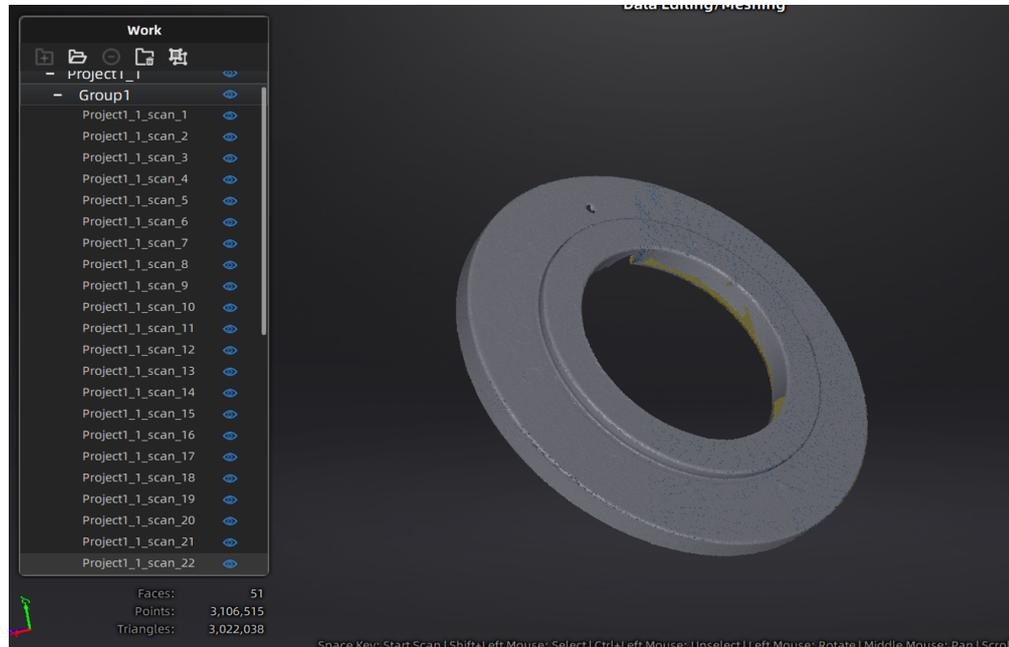


Figura 6.4: Esempio di scansione effettuata nello stabilimento SKF con Eiscan-SP

6.2.3 Chiamata audio e video

Alla base della manutenzione assistita da remoto vi è una chiamata audio e video chiara, in cui l'utente meno esperto mostra ciò che vede nel mondo fisico e viene guidato dal più esperto nell'esecuzione della procedura. Per poter implementare un sistema di chiamata semplice ma efficace, testato unicamente in una rete locale, si è utilizzato il protocollo WebRTC, ottimale in caso di comunicazione peer-to-peer bidirezionale. Per poter funzionare correttamente, è necessario un server di "signaling", che funge da intermediario tra i due utenti e consente lo scambio di metadati. Il server utilizzato per garantire questo tipo di connessione è basato su Node.js, in grado di inviare segnali in modo permanente, semplice, veloce e, soprattutto, multiplatforma, come nel caso di interazione tra un dispositivo Hololens 2 e un pc Desktop.

Prima di iniziare ad utilizzare la funzione di chiamata da parte di entrambi i dispositivi, è necessario che il server sia operativo. Per il caso d'uso è stato utilizzato un pc Notebook, impostato come server attraverso il prompt dei comandi.

Dopo aver installato node.js, è stato lanciato il server in ascolto sulla porta 3000. Tramite le funzioni di libreria GET e POST è possibile risalire ai metadati ricevuti ed inviati, da e verso un ID altrettanto visibile. Una volta che il server è attivo, per poter funzionare su entrambi gli applicativi è necessario fornire due informazioni, impostate di default nel caso d'uso per motivi di test, ma con possibilità di essere cambiati in tempo reale: un ID, corrispondente al nome del dispositivo, che può essere trovato nelle impostazioni (es: HOLOLENS-HMRMFB per l' Hololens 2 utilizzato) e un indirizzo IP corrispondente all'indirizzo del server Node.js, indicando la porta /3000 alla fine dell'indirizzo. Per poter inserire queste ultime informazioni all'interno degli applicativi, è stato utilizzato un oggetto di tipo Prefab presente all'interno della libreria MixedReality-WebRTC, presentata nel capitolo precedente. Il Prefab contiene uno script al suo interno che richiede, come variabili pubbliche, le due informazioni e le utilizza per generare una connessione con peer-to-peer tramite l'indirizzo IP indicato come server, consentendo anche di impostare un poll time per non pesare eccessivamente su quest'ultimo, come illustrato in Fig. 6.5.

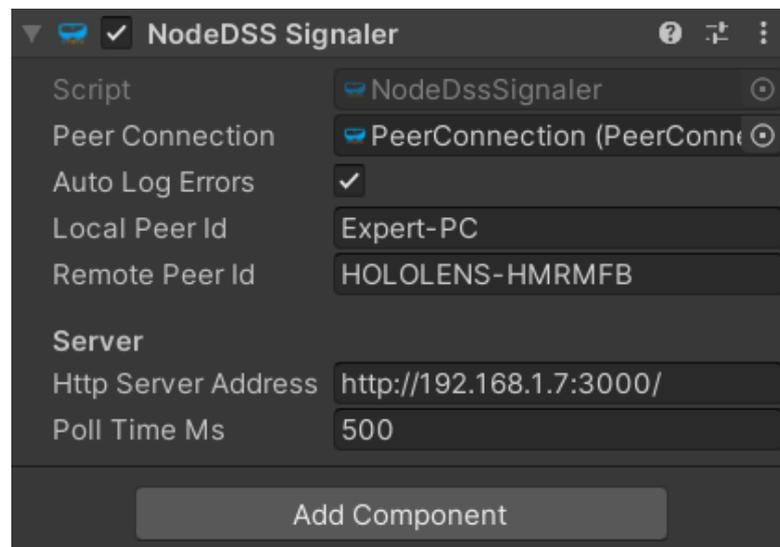


Figura 6.5: Impostazioni interne su Unity

Una volta ottenuto lo scambio di metadati in tempo reale, è necessario visualizzare lo streaming video all'interno dell'applicativo. Per fare ciò, trattandosi di un ambiente tridimensionale, si è preferito associare lo streaming video locale e remoto a delle texture applicate su pannelli 2D. I pannelli, come verrà spiegato in seguito nel paragrafo dedicato all'interfaccia, sono interamente manipolabili su Hololens, consentendo di portare con sé lo streaming video, sono, invece, fissi ma facilmente scalabili nell'applicativo Desktop, così da poter ingrandire la vista qualora sia necessario. Anche in questo caso è stato utilizzato un Prefab presente all'interno della

libreria MixedReality-WebRTC, con uno script omonimo che richiede di impostare due pannelli per la ricezione del video locale e da remoto e due oggetti vuoti con uno script di sorgente audio impostati per la ricezione di audio locale e remoto.

6.2.4 Manipolazione condivisa del modello

Se, da una parte, la chiamata audio e video è alla base di una manutenzione assistita da remoto, risulta fondamentale, per un'esperienza in realtà aumentata, la presenza di modelli 3D presenti sulla scena come ologrammi, che possono essere manipolati da entrambi gli utenti per consentire la corretta somministrazione di una procedura guidata. Come da design dell'architettura progettuale in Fig. 6.1, è necessario che ci sia uno scambio di dati in tempo reale traducibile con la ricezione di eventi da parte di entrambi gli utenti, attraverso l'utilizzo del pacchetto per Unity Photon Unity Networking 2 (PUN2). Gli eventi, chiamati e gestiti attraverso la libreria RPC del pacchetto, possono corrispondere sia all'istanziamento o distruzione di modelli in scena, sia all'esecuzione di funzioni sui modelli condivise, dopo aver premuto alcuni pulsanti, sia alle posizioni nella scena 3D aggiornate in tempo reale da parte di entrambi gli utenti.

Dopo l'installazione del pacchetto all'interno dell'applicativo, per poter utilizzare i server privati messi a disposizione da Photon è necessario creare un Account nel relativo sito, entrare nella propria pagina impostazioni e selezionare un server per la propria applicazione. Una volta creato l'account, dallo stessa pagina sarà possibile osservare tutti gli accessi ad esso, fino ad un tempo massimo di 24 ore.



Figura 6.6: La gestione del server sul proprio profilo online di Photon

Nella Fig. 6.6 è possibile osservare un App ID, corrispondente ad un codice identificativo unico del server. Inserendo questo codice all'interno delle impostazioni del pacchetto PUN2 di Unity, tutti gli script contenenti funzioni Photon saranno

reindirizzati a quel server indicato, consentendo così uno scambio di dati esclusivo tra dispositivo Hololens 2 e PC Desktop.

All'interno dell'applicativo, sono state utilizzate alcune librerie e script offerti da Photon, adattandoli al caso d'uso. In particolare, all'avvio dell'eseguibile, il primo dei due utenti che accede al server crea una lobby di gioco, su cui sono successivamente caricati tutti gli elementi condivisi. Il secondo utente che accede al server, qualora sia già presente una lobby, non ne crea un'altra ma accede all'unica presente, consentendo così di poter accedere agli elementi condivisi in tempi diversi (utile nel caso di crash dell'applicazione e successiva riesecuzione ad esempio).

All'interno della stanza di gioco è possibile indicare, tramite scripts, degli assets come utenti, la cui posizione viene aggiornata in tempo reale e che possono interagire con gli altri asset presenti in scena, indicati come "visibili" in Photon. Gli utenti in questo caso sono due e sono rappresentati mediante lo stesso avatar corrispondente ad una mano 3D, che si muove all'interno dello spazio. Per quanto riguarda l'interazione con gli altri asset, è possibile impostare un ordine di appartenenza: quando un utente interagisce con un oggetto condiviso, questo diventa "master" di quell'oggetto. In Photon è possibile impostare se un utente sia sempre il master di un asset, ottenendone quindi un uso esclusivo, se sia master fino a quando non accetti una richiesta di passaggio da parte di un altro utente o se sia master fino a quando interagisce con l'oggetto, così da poter passare il master ad un altro utente senza approvazione. Per l'applicativo in analisi, si è scelta questa ultima opzione, consentendo così sia all'utente esperto che al tecnico di poter interagire liberamente con gli oggetti.

Oltre ai due utenti presentati, le macro-categorie di oggetti condivisi inserite sono tre: un piano base, la cui mesh è stata resa invisibile per Hololens 2, ma che viene usato da entrambi gli utenti come oggetto "ancora" su cui caricare tutti gli altri oggetti condivisi; un modello di elettromandrino unico, inserito per la funzione di visualizzazione del modello 3D in scena o come ologramma in realtà aumentata, che può essere scomposto rivelando le sue componenti interne in caso di analisi più accurata; un tavolo da lavoro su cui sono posizionate tutte le singole componenti dell'elettromandrino, ciascuna manipolabile, per mostrare la procedura di assemblaggio del macchinario.

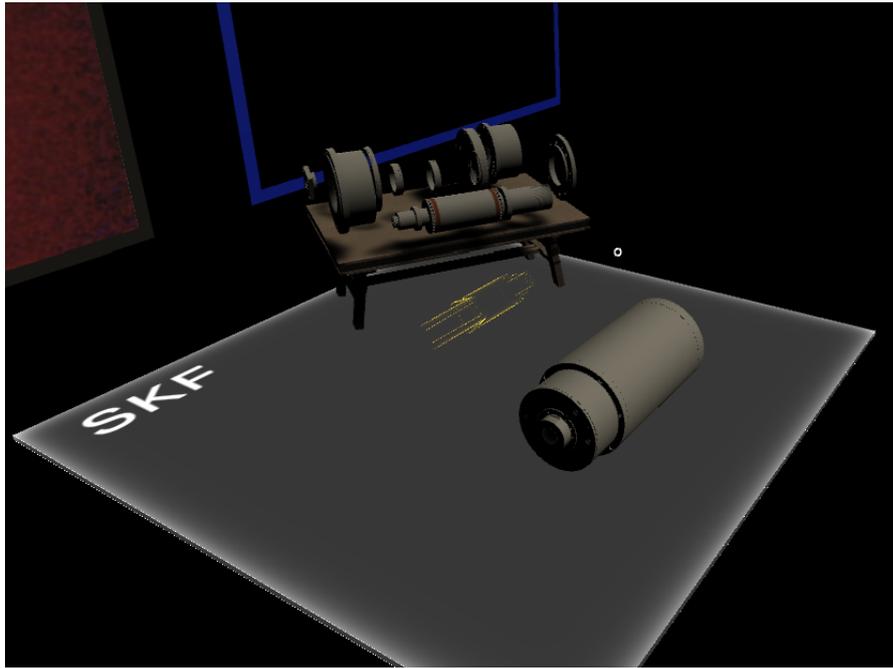


Figura 6.7: Tutte le macro-categorie di oggetti condivisibili in scena

A livello implementativo interno, è stato posizionato sulla scena un oggetto vuoto, Prefab del pacchetto PUN2, su cui sono stati passati come gameObject pubblici i Prefabs di tutti gli asset creati, tra oggetti, utenti e piano condiviso, così da facilitare la loro istanziazione in scena e la loro distruzione. Agli utenti è stato impostato a True la spunta relativa all'essere un utente, all'interno del component Generic Net Sync, che si occupa della sincronizzazione ed è presente in tutti gli asset condivisi. Altro script presente in tutti gli asset è Photon View, che si occupa della gestione della proprietà degli oggetti o degli utenti.

Nel caso venga posizionato il singolo modello 3D, su di esso sono possibili le operazioni di Distruzione, Reset e Visualizzazione Scomposta. Tutte le funzioni sfruttano gli script di Photon precedentemente elencati, con delle funzioni ad hoc per le prime due operazioni e, nel caso della Visualizzazione Scomposta, è stato associato uno script che porta ogni componente interna dell'elettromandrino nella posizione della medesima componente, ma nascosta, di un elettromandrino deassemblato. Essendo entrambi i mandrini, quello unico e quello nascosto, figli di uno stesso GameObject, questa funzione di espansione può essere applicata in qualunque punto dello spazio. Nel caso si voglia procedere con la procedura di assemblaggio, sono due gli elettromandrini presenti in scena: uno, invisibile se non per la componente dell'albero interno, funge da collider per ogni pezzo del macchinario; l'altro è visibile ed è scomposto in tutte le sue componenti sopra il tavolo 3D. Ad ogni componente è

associato un ID fisso, ed è presente un contatore comune ad entrambi gli utenti, condiviso tramite eventi e sfruttando la libreria RPC di Photon. Quando una componente viene presa e posizionata in corrispondenza della giusta posizione, individuata tramite il suo collider invisibile, viene controllato il counter di entrambi gli utenti: se il counter corrisponde all'ID, si tratta del giusto pezzo da assemblare nell'ordine, e la sua posizione viene fissata all'empty che racchiude tutto il modello. Se il controllo ritorna False, nonostante i due elementi abbiano lo stesso ID e la posizione sia corretta, non viene unito al modello finale, lasciando intendere che non è il giusto componente da inserire. Qualora avvenisse una chiamata a Distruzione o Reset, il counter di entrambi gli utenti sarebbe azzerato, e nell'ultimo caso tutti gli oggetti tornerebbero alla loro posizione di default.

6.2.5 Interfaccia utente

La struttura della UI è stata studiata separatamente per entrambi gli utenti, trattandosi di due dispositivi di output molto diversi, con un differente sistema di input e con un utilizzo dell'applicativo diverso (un tecnico che può spostarsi all'interno dell'ambiente reale ed un esperto che resta seduto davanti lo schermo). Entrambi gli applicativi prevedono, all'avvio, una finestra 3D iniziale in cui viene spiegato, esclusivamente tramite testo, l'obiettivo dell'applicativo, le funzioni dei pulsanti principali e come sia possibile interagire e muoversi all'interno della scena, in base al dispositivo utilizzato.

Nel caso di applicazione versione Desktop, l'interfaccia si presenta come visibile in Fig. 6.8:

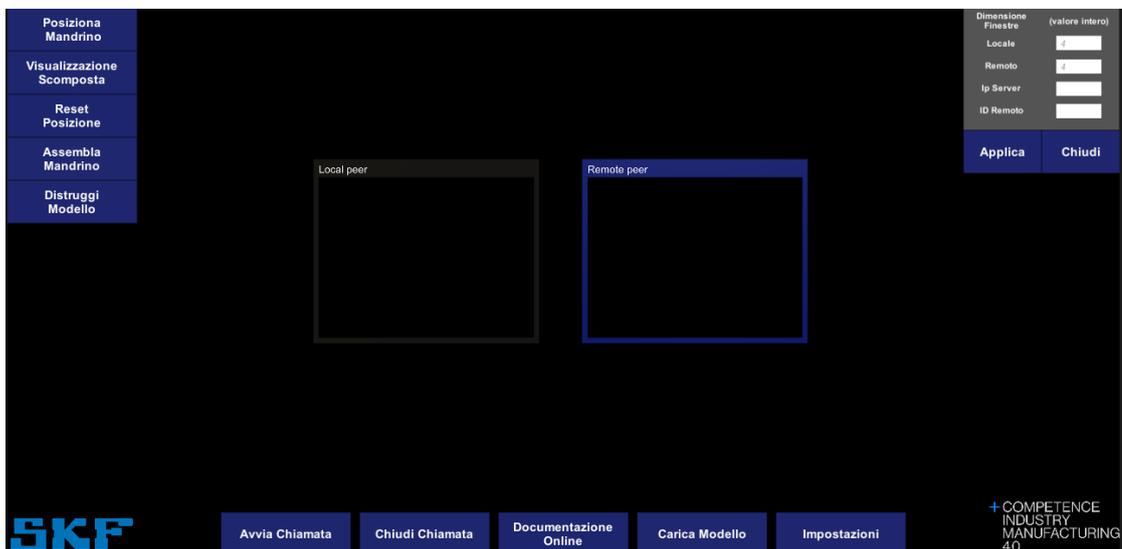


Figura 6.8: L'interfaccia dell'applicativo versione Desktop

Tutte le funzioni possibili, che racchiudono il design dell'architettura progettuale, sono state raccolte in Unity all'interno di un oggetto canvas che compone l'interfaccia e che mostra dei pulsanti 2D a cui sono collegati degli scripts interni per ogni funzione. All'avvio dell'applicativo solo i pulsanti del menù in basso sono visibili, mentre i due pannelli ai lati, illustrati per completezza in figura, sono nascosti a meno che non vengano premuti i pulsanti di "Impostazioni" per il pannello a destra e "Carica Modello" per il pannello a sinistra. La schermata, versione Pc Desktop, è dunque così composta:

- **Schermata centrale:** composta, nella fase iniziale, dai soli due pannelli di chiamata utenti. La loro dimensione occupa metà dello schermo, scelta voluta per consentire all'utente esperto di avere una visione chiara di ciò che vede il tecnico in loco. Sul bordo superiore di ogni pannello viene specificato il nome dell'utente corrispondente allo streaming della camera, ed entrambi i pannelli possono essere scalati in qualsiasi dimensione intera attraverso il menù delle impostazioni, cliccando sul pulsante applica per confermare le modifiche. La schermata centrale può altresì contenere modelli 3D, qualora questi vengano istanziati.
- **Schermata in basso:** questa schermata è sempre visibile per tutta l'esecuzione dell'applicativo, e non può essere nascosta. In essa sono presenti diversi pulsanti, i primi a sinistra sono quelli legati alla gestione della chiamata: tramite "Avvia Chiamata", viene attivato lo streaming video attraverso signaling (illustrato nel paragrafo 6.2.3), mentre "Chiudi Chiamata" interrompe il flusso di metadati. Il pulsante di "Documentazione Online" è uno dei pochi bottoni, insieme alle impostazioni, il cui funzionamento non è condiviso con l'altro utente. Tramite questo pulsante viene aperta una pagina Web Browser esterna, che può essere legata a qualsiasi indirizzo Web, come ad esempio una pagina interna all'azienda su cui poter visionare documentazione o accedere al proprio account utente. Il pulsante "Carica Modello" è il pulsante iniziale per l'avvio della scena condivisa: premendolo, infatti, viene caricato il piano condiviso ad entrambi gli utenti, su cui possono essere caricati tutti i modelli o ologrammi interattivi. Una volta caricato il piano, sarà visibile un menù laterale sinistro, contenente tutte le funzioni dedicate all'interazione con i modelli 3D. Infine, il pulsante "Impostazioni" consente di aprire il menù laterale destro contenente varie opzioni di configurazione, che sarà spiegato nel dettaglio in seguito.
- **Schermata laterale sinistra:** questa schermata compare solo nel momento in cui viene premuto il pulsante "Carica Modello". I pulsanti contenuti consentono di interagire con tutti i tipi di modelli condivisi, in ordine: il bottone "Posiziona Mandrino" consente, qualora non sia già presente, di caricare un modello unico di elettromandrino che può essere manipolato da entrambi gli utenti. Quando

l'oggetto 3D è presente, tramite il pulsante "Visualizzazione Scomposta" è possibile espanderlo, consentendo la visualizzazione di tutte le componenti presenti al suo interno. Le proprietà di manipolazione restano le stesse per entrambi gli utenti, che possono continuare a muovere il mandrino nella sua interezza. In aggiunta, nella versione scomposta sono presenti dei pannelli 3D indicanti il nome della componente toccata, per una maggiore comprensione. Premendo nuovamente il pulsante, il modello 3D viene ricomposto nella sua forma originaria. E' presente anche il bottone "Assembla Mandrino", che istanzia sul piano di lavoro un tavolo 3D e le componenti del mandrino disassemblate. Per una maggiore comprensione e riconoscimento degli oggetti, i modelli sono caricati a blocchi di dieci, e quando una delle componenti visibili viene selezionata, sopra di essa compare un pannello 3D con il nome della stessa e un ID riferito all'ordine di assemblaggio. "Reset Posizione" e "Distruggi Modello" sono gli ultimi pulsanti presentati, e valgono sia per il modello 3D unico che per il modello da assemblare, qualora sia presente almeno uno dei due nella scena. Con il primo bottone, il/i Prefab presenti ritornano nella loro posizione originaria, senza essere nuovamente istanziati. Vengono conservate le posizioni iniziali e si sfrutta il piano alla base dell'area di lavoro per individuare i valori (x,y,z) relativi alla traslazione e rotazione. Nel caso di Reset per il modello da assemblare, oltre al ritorno alla posizione di partenza viene anche azzerata la procedura di assemblaggio, mostrando nuovamente le prime dieci componenti da assemblare. Con il bottone "Distruggi" invece, vengono eliminati tutti i modelli condivisi presenti sulla scena, che possono essere istanziati nuovamente.

Tutti i pulsanti presentati in questa schermata prevedono dei pannelli 3D di errore, qualora vi sia già un modello caricato e se ne voglia istanziare uno identico, o qualora si voglia eseguire un'operazione legata ad un modello non ancora presente sulla scena.

- **Schermata laterale destra:** questa schermata compare solo dopo aver premuto il pulsante "Impostazioni" e può essere chiusa tramite l'apposito pulsante "Chiudi". E' composta da un pannello grigio contenente una serie di variabili di testo in input, che consentono di impostare diversi attributi dell'applicativo. In particolare, in ordine di sequenza come illustrato in Fig. 6.8, è possibile variare la grandezza dei singoli pannelli di videochiamata locale e da remoto, cambiare l'utente con cui si vuole avviare lo scambio di metadati o usare un altro server Node.js di destinazione, inserendo un nuovo indirizzo IP e specificando la porta /3000. Una volta applicate le opportune modifiche, è presente un pulsante "Applica" per renderle definitive all'interno dell'applicativo. Il pannello viene chiuso attraverso l'apposito pulsante "Chiudi".

Per quanto concerne la modalità di navigazione per l'applicativo Desktop, è

possibile muoversi all'interno della scena 3D utilizzando i pulsanti W,A,S e D da tastiera, mentre viene premuto il pulsante destro del mouse per cambiare l'orientamento della visuale. Quando si vuole interagire con un modello condiviso, è possibile ottenerne la proprietà e spostarlo all'interno della scena tenendo premuto il pulsante sinistro del mouse. Tutti i pulsanti 2D presenti sull'interfaccia sono utilizzabili premendo una sola volta il tasto sinistro del mouse.

Nel caso di applicativo versione Hololens l'interfaccia si presenta come mostrato in Fig. 6.9:

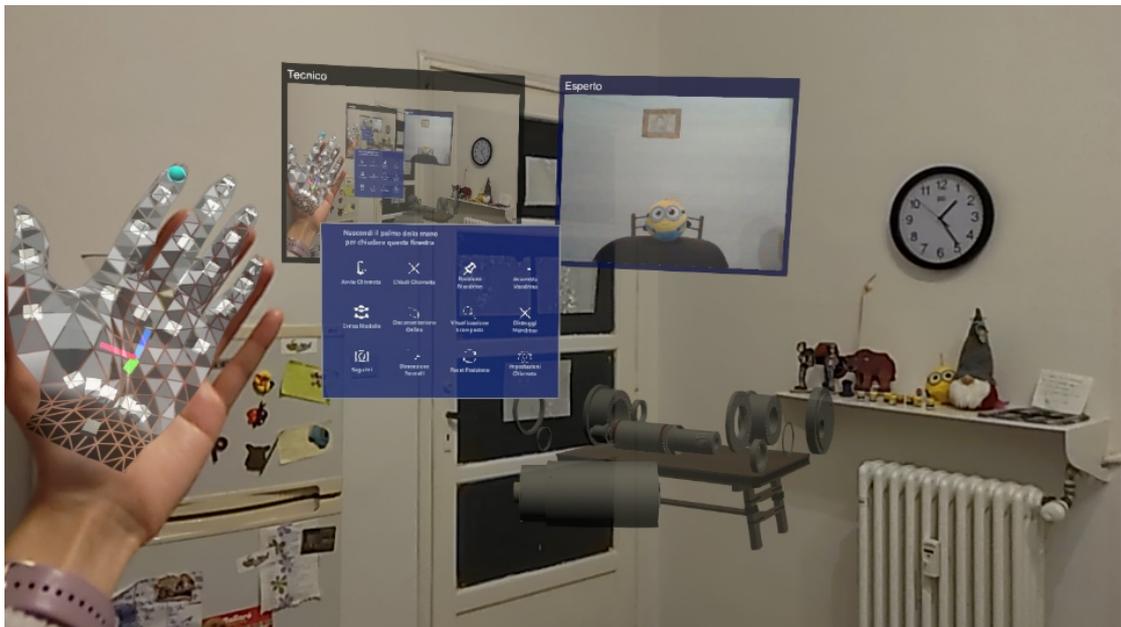


Figura 6.9: L'interfaccia dell'applicativo per App Hololens

L'obiettivo, in questo caso, è di mantenere un'interfaccia che sia quanto più libera possibile. Lo scenario di vista del tecnico in loco prevede l'utilizzo dell'applicativo quando questi si trova davanti al modello di elettromandrino reale su cui effettuare la procedura di manutenzione. In tal senso, gli ologrammi 3D devono essere di supporto alla procedura, non ostacolarla, pertanto la schermata frontale dell'applicativo per Hololens 2 prevede l'area centrale priva di elementi 3D, con solo i due pannelli di videochiamata descritti precedentemente e posti nella parte superiore della vista, in lontananza. Entrambi i pannelli sono visibili: la necessità di vedere se stessi oltre che l'interlocutore da remoto, mostrando quindi anche il pannello dello streaming locale, è stata suggerita dalla stessa azienda, in quanto la vista del proprio operato fornisce un punto di vista esterno all'interno dell'ambiente

e delle manovre che vengono eseguite.

Al fine di non inserire troppi elementi tridimensionali fissi, si è deciso di implementare un "Menù Manuale", composto da un pannello 3D su cui sono posti dei bottoni interattivi, il quale compare solo al riconoscimento del palmo della mano dell'utente da parte della camera. Il menù di navigazione, in questo caso, prevede quindi un sistema di input basato unicamente sulla gestualità della mano, sia per l'esecuzione di funzioni tramite la selezione dei pulsanti sia per la manipolazione degli ologrammi, per sfruttare tutte le potenzialità offerte dal dispositivo Hololens 2. Le funzioni presenti in questo applicativo sono le stesse della versione Desktop, ma con alcune differenze nell'interazione e nell'interfaccia. In particolare, per le differenze:

- Impostazioni generali: quando viene premuto il pulsante viene istanziato un pannello 3D in cui è possibile cambiare l'utente con cui si vuole avviare lo scambio di metadati o usare un altro server Node.js di destinazione, inserendo un nuovo indirizzo IP e specificando la porta /3000. I dati, in questo caso, vengono inseriti mediante una tastiera virtuale a scomparsa.
- Impostazioni pannelli: questa sezione del menù Impostazioni è stata resa indipendente sull'applicativo Hololens 2, poiché l'operazione può essere effettuata direttamente sui pannelli. Quando viene selezionato il pulsante, ai bordi di ogni pannello sono resi visibili delle ancore, usate sia per spostare i pannelli nello spazio che per scalare la loro dimensione.
- Doppio menù: per sostituire i menù a scomparsa della versione Desktop, sono stati creati due menù manuali. Il primo, ridotto, è quello presentato all'avvio dell'applicativo e mostra le funzioni presenti, nella versione Desktop, all'interno della schermata in basso. Il menù manuale esteso viene mostrato solo dopo che è stato premuto il pulsante "Carica Modello" sul menù manuale ridotto.

Capitolo 7

Risultati e analisi

Lo sviluppo di un applicativo autonomo in Realtà Aumentata, con la definizione di un architettura progettuale e un implementazione che soddisfi tutti i requisiti, deve prevedere una fase finale di analisi delle performance e della qualità del sistema creato. Qualsiasi calo di performance durante l'utilizzo infatti, potrebbe non soddisfare tutti i requisiti. Gli obiettivi principali analizzati in questa fase, per entrambe le versioni dell'applicativo proposto, sono i seguenti:

1. Possibilità di poter comunicare, tramite chiamata audio e video, con un altro utente connesso alla medesima rete locale
2. Possibilità di visionare, in tempo reale, un modello 3D condiviso
3. Possibilità di assemblare un modello 3D a partire da tutte le sue componenti deassemblate
4. Possibilità di accedere ad una documentazione online

Tutti e quattro i punti chiave devono essere, nel caso di funzionamento ideale del programma, eseguibili in modo chiaro e fluido, senza sforzi anomali da parte dell'utente, con assenza di cali di FPS o portare ad una chiusura inaspettata dell'eseguibile.

Al termine dello sviluppo dell'applicazione in Unity 3D, è stato raccolto un gruppo di 12 persone a cui è stato chiesto di testare l'esperienza sia in Realtà Aumentata, tramite Hololens 2, che in applicazione 3D, tramite PC Desktop, al fine di ottenere una valutazione soggettiva della qualità del programma, e raccogliere suggerimenti per ulteriori miglioramenti.

Al gruppo di tester sono state fornite inizialmente tutte le informazioni sullo scopo dell'applicativo, sulle varie funzioni e su come interagire con gli ologrammi nel caso di test con Hololens 2, oggetti 3D nel caso di test con PC Desktop. Al termine

dell'utilizzo completo di tutte le funzionalità con entrambi gli applicativi, è stato chiesto di rispondere ad un questionario (presentato in Appendice A di questo elaborato) che ha consentito di raccogliere opinioni ed impressioni circa l'usabilità del sistema, la facilità del sistema di navigazione e di input, e le performance generali del programma.

7.1 Definizione dei test sui casi d'uso

Il questionario proposto si compone di quattro parti: la prima parte serve a raccogliere informazioni generiche sul candidato; la seconda parte comprende le domande sulla scala di usabilità del sistema, basate sul test System Usability Scale (SUS) e somministrate due volte per utente, corrispondenti alle valutazioni per l'applicativo versione Hololens 2 e Desktop; la terza parte del questionario comprende altre domande soggettive, dedicate alle condizioni psico-fisiche del candidato, e basate sul test Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). Considerato che le condizioni legate all'utilizzo di PC Desktop sono largamente note, si è preferito rivolgere le domande di questo test all'utilizzo dell'applicativo nella sola versione Hololens 2. Ultima parte del questionario comprende una serie di domande aggiuntive e ad hoc basate sulle le funzionalità chiave implementate nel progetto, ispirate alle domande dei test soggettivi VRUSE e TLX, specifici per la Realtà Mista.

Di seguito sono presentate tutte le domande del questionario, divise per tipologia di test, mentre nell'ultimo paragrafo è stata effettuata un'analisi dei risultati ottenuti. La prima parte, generica ed indipendente dai test successivi, ha compreso le seguenti domande:

- **Età**
- **Sesso**
- **Hai mai avuto esperienze con la Realtà Aumentata?**
- **Hai mai avuto esperienze con Hololens?**

Queste domande iniziali sono a compilazione obbligatoria e a risposta libera.

7.1.1 Questionario sull'usabilità del sistema (SUS)

La seconda parte presenta il test SUS, un questionario che consente di valutare l'adoperabilità di un sistema rispondendo a 10 domande. Per ognuna, è possibile dare un voto da 1 a 5, corrispondente a quanto l'utente si trovi in accordo o disaccordo con le affermazioni proposte (voto 1 equivale ad essere in "forte disaccordo", mentre

con voto 5 si è "fortemente d'accordo"). Questo test, creato nel 1986 da John Brooke, costituisce uno strumento affidabile e veloce per la misura dell'usabilità, comprensibile per qualsiasi tipo di partecipante. Il vantaggio nell'utilizzarlo in questo elaborato è dovuto anche alla sua versatilità: esso può essere utilizzato per un'ampia varietà di prodotti e servizi, tra dispositivi Hardware, Software, e siti Web ad esempio.

Le domande di questa sezione sono identiche per entrambe le versioni dell'applicativo, e sono state compilate due volte per utente, corrispondenti a ciascun dispositivo di output. Esse sono presentate nel test come affermazioni, e sono le seguenti:

- **D1: Ho trovato il sistema esageratamente complesso**
- **D2: Penso che vorrò utilizzare il sistema frequentemente**
- **D3: Penso che il sistema sia semplice da usare**
- **D4: Penso sia necessario il supporto di un tecnico per poter utilizzare il sistema**
- **D5: Ho trovato le varie funzioni ben integrate nel sistema**
- **D6: Penso vi siano troppe inconsistenze nel sistema**
- **D7: Presumo che la maggior parte degli utenti imparerà facilmente il sistema**
- **D8: Trovo il sistema molto ingombrante**
- **D9: Mi sento molto sicuro nell'utilizzo del sistema**
- **D10: Ho bisogno di un tutorial prima di utilizzare il sistema**

Prima di poter rispondere a questa sezione del questionario, tutte le funzionalità presenti all'interno del programma devono essere state provate (piazzamento del modello 3D, il suo assemblaggio, il reset della posizione, la distruzione, la chiamata audio e video, le impostazioni e la visione della documentazione online).

7.1.2 Questionario di simulator sickness (SSQ)

La terza parte presenta il test SSQ, un test sviluppato nel 1993 da Kennedy et al., che consente di valutare quanto il sistema influenzi le condizioni psichiche e fisiche del candidato. L'ambito del questionario riguarda l'impiego di dispositivi che possano portare a sviluppare i sintomi esaminati, pertanto il caschetto per la Realtà Aumentata è stato considerato un dispositivo idoneo. Nonostante il test originale sia composto da 16 domande con una scala di valori da 1 a 4 (corrispondenti a

"nessun sintomo, "leggero", "moderato" "severo"), il questionario sviluppato per questo elaborato ne contiene solo 10, con lo stesso range di voti del test precedente da 1 a 5 (corrispondenti rispettivamente a "fortemente in disaccordo" e "fortemente d'accordo").

Al fine di poter valutare se la comparsa e gravità dei sintomi sia dipesa dall'utilizzo del dispositivo, è stato chiesto ai candidati di sostenere due volte questa sezione: una volta precedente all'utilizzo dell'applicativo, e la seconda dopo aver concluso la sessione. Inoltre, prima dell'avvio dell'esperienza in Realtà Aumentata è stato verificato che il dispositivo fosse stato indossato correttamente, e che i valori di luminosità fossero adeguati a vedere gli ologrammi in modo chiaro e definito.

Anche in questo caso le domande sono poste come affermazioni, e sono le seguenti:

- **D1: Sconforto generico**
- **D2: Mal di testa**
- **D3: Affaticamento degli occhi**
- **D4: Stanchezza**
- **D5: Difficoltà di messa a fuoco**
- **D6: Eccessiva salivazione**
- **D7: Sudorazione**
- **D8: Nausea**
- **D9: Difficoltà a concentrarsi**
- **D10: Visione offuscata**
- **D11: Vertigini con occhi aperti**
- **D12: Vertigini con occhi chiusi**
- **D13: Mal di stomaco**

Prima di poter rispondere a questa sezione del questionario, tutte le funzionalità presenti all'interno del programma devono essere state provate (piazzamento del modello 3D, il suo assemblaggio, il reset della posizione, la distruzione, la chiamata audio e video, le impostazioni e la visione della documentazione online).

7.1.3 Domande aggiuntive basate su TLX VRUSE

La quarta ed ultima parte del questionario presenta delle domande aggiuntive sviluppate sulla base delle funzionalità offerte dall'applicativo, per la cui formulazione ci si è basati su test soggettivi ufficiali quali TLX e VRUSE.

Il Virtual Reality Usability System Evaluation (VRUSE) è stato progettato per misurare l'usabilità di un sistema in Realtà Mista in base all'interazione e alla percezione degli utenti. Mentre i precedenti test possono essere adattati a qualsiasi tipo di dispositivo, validi quindi per interfacce generiche, VRUSE è specificamente progettato per la valutazione di ambienti virtuali, rivelandosi un utile strumento diagnostico che fornisce una vasta gamma di informazioni sia dal punto di vista dell'interfaccia che dell'usabilità per l'utente.

Il Task Load Index (TLX) è un test ufficiale della NASA, creato da Sandra Hart negli anni '80 presso l'Ames Research Center (ARC). Inizialmente erogato su carta e matita, è ad oggi consultabile online e disponibile in diversi formati digitali. Esso consente di valutare il carico di lavoro soggettivo del candidato, in un ambiente di interazione uomo-macchina. Questo test prevede una serie di affermazioni con domande che riguardano lo sforzo mentale e fisico, domande temporali, domande inerenti alla prestazioni dell'applicativo e alla frustrazione provata nello svolgimento dei compiti assegnati.

Sulla base di questi due test sono state formulate un massimo di 19 domande, che consentono di effettuare un'analisi circa la qualità ed usabilità di tutte le funzioni proposte. Per ciascuna domanda, è possibile dare un voto da 1 a 5, corrispondente a quanto l'utente si trovi in accordo o disaccordo con le affermazioni proposte (voto 1 equivale ad essere in "forte disaccordo", mentre con voto 5 si è "fortemente d'accordo").

- **D1: Ho trovato il sistema di videochiamata semplice da utilizzare**
- **D2: L'audio della chiamata permette una comunicazione chiara**
- **D3: Il video durante la chiamata è sempre ad un framerate accettabile**
- **D4: L'effetto di flickering è molto presente**
- **D5: Il dispositivo è comodo da indossare**
- **D6: La condivisione degli oggetti 3D facilita la comunicazione e il passaggio di informazioni**
- **D7: La scena virtuale presenta troppi elementi tali da rendere impossibile operare sul modello reale**

- **D8:** Sarei in grado di assemblare l'elettromandrino anche senza la videocchiamata, sfruttando i suggerimenti presenti su ogni pezzo del modello
- **D9:** La funzione di Visualizzazione Scomposta consente una visione chiara di ogni componente presente nell'elettromandrino
- **D10:** Le parole o simboli mostrati nel display sono facili da leggere
- **D11:** Ho trovato il dispositivo di input facile da usare (gesture e bottoni)
- **D12:** Le funzioni possibili attraverso l'interazione con i bottoni sono chiare e comprensibili
- **D13:** Il campo visivo (FOV) di visualizzazione era appropriato per le procedure
- **D14:** Ho trovato facile manipolare gli oggetti nell'ambiente
- **D15:** Quando spostavo la testa la qualità dell'immagine era accettabile
- **D16:** Navigare nell'ambiente virtuale è stato intuitivo
- **D17:** Sono soddisfatto delle performance generali dell'applicazione (framerate, responsività)
- **D18:** Reputo molto utile la possibilità di avere entrambe le mani libere per poter effettuare altre operazioni nel contesto reale
- **D19:** Utilizzerei questo sistema rispetto ad uno tradizionale (pc/tablet, pc/smartphone, pc/pc)

Prima di poter rispondere a questa sezione del questionario, tutte le funzionalità presenti all'interno del programma devono essere state provate (piazzamento del modello 3D, il suo assemblaggio, il reset della posizione, la distruzione, la chiamata audio e video, le impostazioni e la visione della documentazione online).

Le domande aggiuntive per la versione Desktop sono identiche alla versione Hololens 2, ma sono state rimosse quelle affermazioni che riguardano l'esperienza con il caschetto di Realtà Aumentata (FOV, gestione input con le mani, tracking della testa):

- **D1:** Ho trovato il sistema di videocchiamata semplice da utilizzare
- **D2:** L'audio della chiamata permette una comunicazione chiara

- **D3:** Il video durante la chiamata è sempre ad un framerate accettabile
- **D4:** L'effetto di flickering è molto presente
- **D5:** La condivisione degli oggetti 3D facilita la comunicazione e il passaggio di informazioni
- **D6:** La funzione di Visualizzazione Scomposta consente una visione chiara di ogni componente presente nell'elettromandrino
- **D7:** Le parole o simboli mostrati nel display sono facili da leggere
- **D8:** Ho trovato il dispositivo di input facile da usare (gesture e bottoni)
- **D9:** Le funzioni possibili attraverso l'interazione con i bottoni sono chiare e comprensibili
- **D10:** Ho trovato facile manipolare gli oggetti nell'ambiente
- **D11:** Navigare nell'ambiente virtuale è stato intuitivo
- **D12:** Sono soddisfatto delle performance generali dell'applicazione (framerate, responsività)

7.2 Analisi dei risultati

L'obiettivo della prima parte del questionario è stato analizzare il gruppo di individui partecipanti al test, raccogliendo informazioni riguardo la loro età, sesso o l'aver avuto precedenti esperienze con la Realtà Aumentata. Inoltre, come esposto nei capitoli precedenti, sono diversi i dispositivi per la Realtà Aumentata attualmente in commercio, differenti tra loro, onde per cui è stata inserita una domanda aggiuntiva in cui si chiedono esperienze pregresse specificatamente con Hololens 2. Il risultato di questa prima parte ha consentito di osservare 7 partecipanti donna e 5 uomini, tutti di età compresa tra i 23 e i 27 anni. Di questi, 7 avevano avuto precedenti esperienze con la Realtà Aumentata, e la medesima percentuale di individui ha dichiarato di aver avuto esperienze con Hololens, lasciando intendere che tutti coloro che hanno sperimentato almeno una volta la Realtà Aumentata, abbiano utilizzato anche l' Hololens.

Per quanto riguarda il test sull'Usabilità del Sistema (SUS) versione Hololens 2, è possibile osservare nel grafico in Fig. 7.1 i risultati:

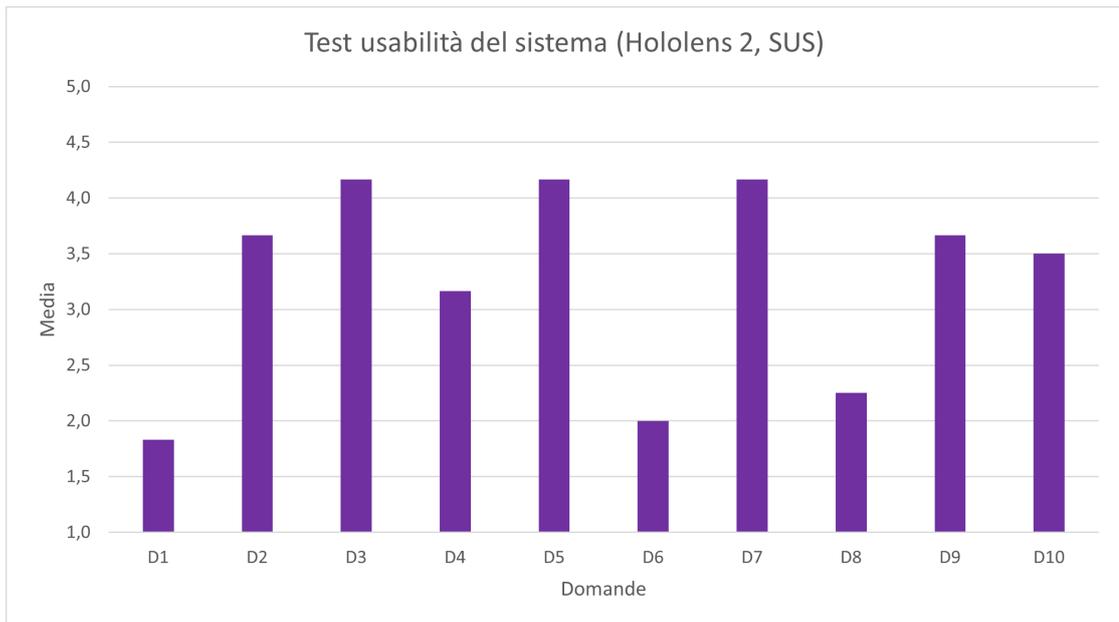


Figura 7.1: Test SUS per versione app Hololens 2

Sull'asse delle ascisse sono rappresentate le domande del test, mentre sull'asse delle ordinate è possibile osservare una media dei voti ottenuti per ciascuna domanda. Sono state considerate domande con un alto indice di gradimento quelle affermazioni che presentano una media di voti superiore a 4 o inferiore a 2, in base alla formulazione della domanda. Tra queste, vi sono le domande D1, D3, D5, D6, e D7: l'analisi effettuata nella prima domanda porta ad osservare come la maggioranza degli utenti consideri il sistema non esageratamente complesso, con una media voti di 1.8 e l'83.4% di valutazioni comprese tra 1 e 2. L'83.3% considera il sistema semplice da usare, con una media voti di 4.2 nella terza domanda. Possibili fattori di influenza per questa domanda sono la somministrazione di un tutorial iniziale, effettuato prima della fase di test, e le precedenti esperienze con Hololens 2 per la maggioranza degli utenti. La quinta domanda, inerente alle funzioni ben integrate all'interno del sistema, presenta un indice di gradimento molto alto, con il 91.7% di utenti fortemente d'accordo. Il risultato di questa domanda legata all'utilizzo con Hololens valuta quindi molto positiva l'integrazione di un menù manuale piuttosto al posto di pulsanti interattivi fissi all'interno della scena 3D. Ad avvalorare questa tesi, la sesta domanda mostra dei valori fortemente in disaccordo con l'affermazione di troppe inconsistenze all'interno del sistema, con una media voti di 2. Il settimo quesito, con una media voti di 4.2 ed una percentuale di risposte "fortemente d'accordo" pari al 50%, asserisce come il sistema è facilmente comprensibile dalla maggior parte degli utenti, rafforzando i risultati delle risposte

precedenti.

una domanda con basso indice di gradimento è la quarta, in cui l'83.3% degli utenti è d'accordo sulla necessità di avere il supporto iniziale di un utente esperto per poter utilizzare il sistema, sebbene la maggioranza dei candidati abbia avuto esperienza con Hololens e la Realtà aumentata.

per quanto riguarda il test sull'Usabilità del Sistema (SUS) versione Desktop, è possibile osservare nel grafico in Fig. 7.2 i risultati:

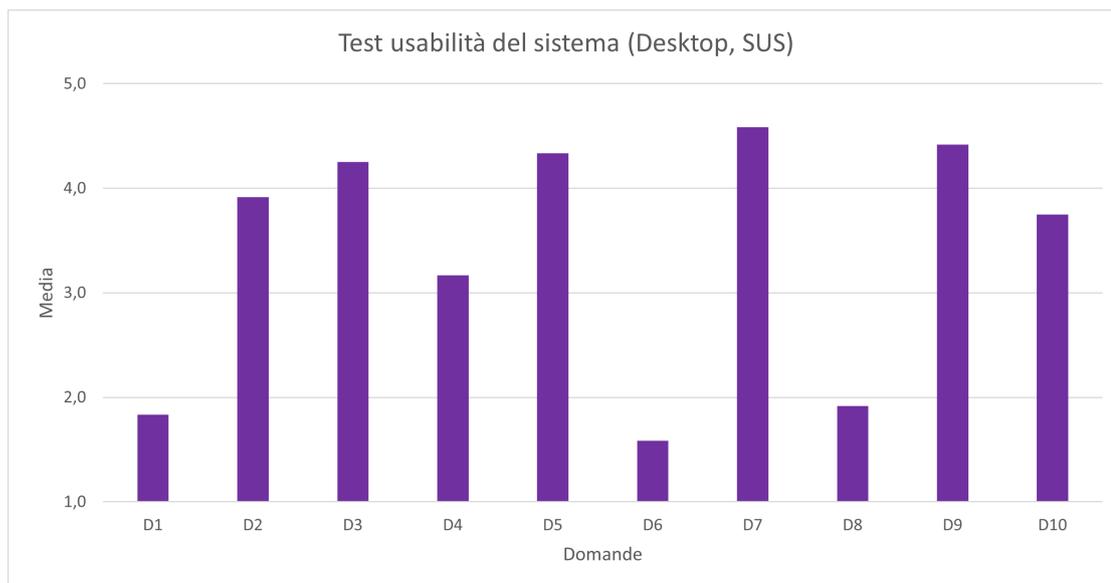


Figura 7.2: Test SUS per versione app Desktop

Anche in questo caso, sull'asse delle ascisse sono rappresentate le domande del test, mentre sull'asse delle ordinate è possibile osservare una media dei voti ottenuti per ciascuna domanda. Sono state considerate domande con un alto indice di gradimento quelle affermazioni che presentano una media di voti superiore a 4 o inferiore a 2, in base alla formulazione di ciascun quesito. A differenza dell'applicativo in versione Hololens, una media di 4.4 voti e il 50% di risposte "fortemente d'accordo" è stata assegnata alla nona domanda, in cui gli utenti si sono sentiti molto sicuri nell'utilizzo del sistema. Ciò è probabilmente dovuto alla tipologia di dispositivo utilizzato, largamente impiegato nel mondo moderno, a differenza dei nuovi caschetti per la Realtà Aumentata. Ad avvalorare questa tesi vi è il risultato dell'ottavo quesito, in cui più del 50% degli utenti trova il sistema assolutamente non ingombrante.

E' possibile osservare nuovamente come la domanda con il più basso indice di gradimento è la quarta, in cui l'83.3% degli utenti è d'accordo sulla necessità di avere il supporto iniziale di un utente esperto per poter utilizzare il sistema. La

risposta a questa valutazione è probabilmente dovuta al particolare sistema di input per la versione Desktop, in cui l'utente deve interagire all'interno di una scena tridimensionale, elemento innovativo presentato da questo elaborato.

A seguire i risultati concernenti il test sulle condizioni fisiche e psichiche del candidato (SSQ). Il test è stato eseguito per il solo dispositivo Hololens, ed è possibile confrontare i grafici delle figure Fig. 7.3 e Fig. 7.4 per analizzare i risultati ottenuti.

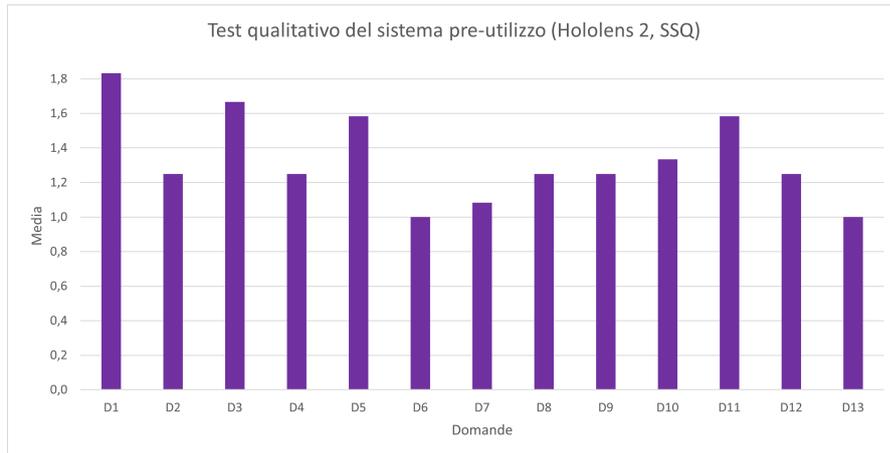


Figura 7.3: Test SSQ per versione App Hololens 2, prima dell'utilizzo

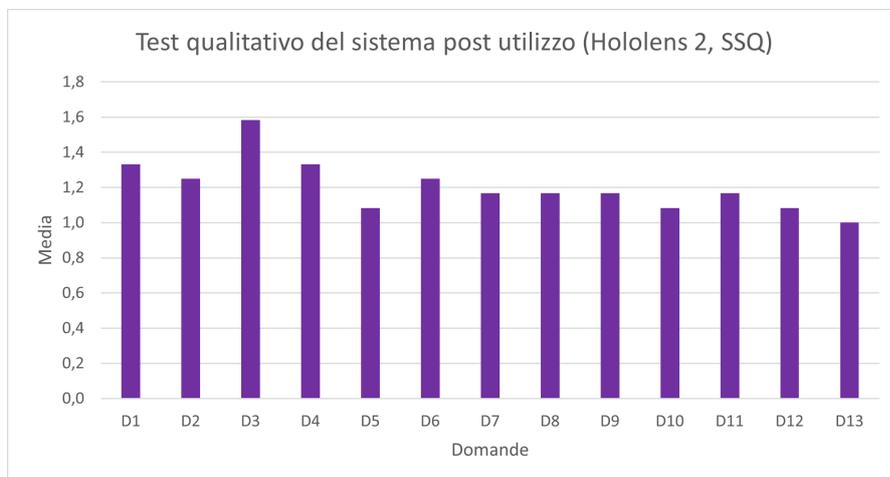


Figura 7.4: Test SSQ per versione App Hololens 2, dopo dell'utilizzo

In questo caso l'analisi è stata effettuata verificando se alcune condizioni di malessere, indicate nel test prima dell'utilizzo, si siano acuite dopo l'esperienza

in Realtà Aumentata. Dal confronto, risulta evidente come la maggioranza dei parametri siano rimasti stabili, e per lo più tendenti al negativo con la media di voti massima raggiunta di 1.8. Dopo l'utilizzo inoltre, alcune percentuali si sono abbassate fino ad un massimo di 0.5 punti percentuali, per le domande D1, D5, D11 inerenti allo sconforto generico, difficoltà di messa a fuoco e visione offuscata. Ciò fa supporre che l'applicativo sia stato visto anche come forma di intrattenimento, alleviando in piccola parte una sensazione di sconforto generico e migliorando l'attività di percezione della vista.

Per quanto riguarda le domande aggiuntive basate sui test VRUSE e TLX, nella somministrazione del questionario per la versione dell'applicativo Hololens 2 è possibile osservare i risultati nella Fig.7.5:

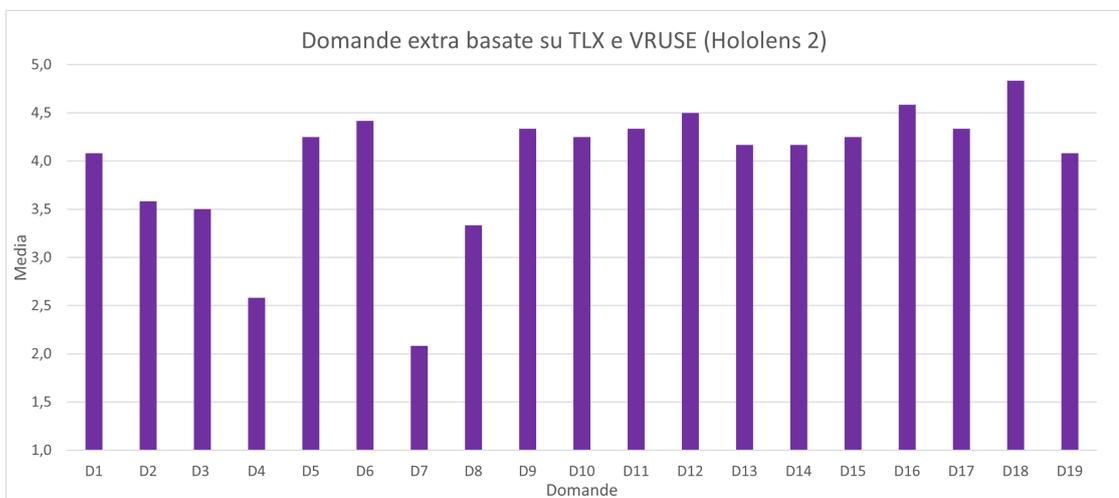


Figura 7.5: Domande Extra per versione app Hololens 2

La media di voti per domande mostra un grafico pressochè omogeneo, con delle risposte oltre il grado di "molto d'accordo" nella metà delle affermazioni. In particolare, il sistema di videocchiamata è stato trovato semplice da utilizzare per l'83.3% degli utenti, mentre il 91.7% degli utenti reputa che la condivisione degli oggetti 3D faciliti la comunicazione e il passaggio di informazioni. L'attento studio dell'interfaccia lato Hololens inoltre, ha consentito di ottenere un alto indice di gradimento nei candidati per quanto concerne il numero di elementi presenti nella scena, in relazione alla capacità di poter operare in contemporanea su un modello reale, con il 75% di candidati favorevoli alla quantità di ologrammi presenti. Altri indici di gradimento molto alti (superiori al 60% e con una media di voti oltre il 4) riguardano la funzione di visualizzazione scomposta, giudicata molto chiara, la facilità di lettura dei pannelli di testo, la manipolazione degli oggetti all'interno dell'ambiente, la navigazione all'interno dell'ambiente virtuale e, soprattutto, l'83.3%

dei candidati è fortemente d'accordo sull'utilità di avere entrambe le mani libere per effettuare altre operazioni nel contesto reale.

E' possibile osservare un basso indice di gradimento nell'ottava domanda, in cui oltre la metà degli utenti (58.4%) non ritiene di essere in grado di assemblare l'elettromandrino senza il supporto tecnico dell'esperto da remoto. Le motivazioni di questa valutazione sono da ricercarsi nella tipologia di pezzi che compongono il macchinario, i quali possono essere considerati molto simili tra loro per utenti poco esperti. Nonostante si sia cercato di ovviare al problema inserendo dei suggerimenti quali un contatore per l'ordine di montaggio e il nome della componente, questi non sono stati ritenuti elementi sufficienti per l'esecuzione dell'assemblaggio in utente singolo.

Per quanto riguarda le domande aggiuntive basate sui test VRUSE e TLX, nella somministrazione del questionario per la versione dell'applicativo Pc Desktop, è possibile osservare i risultati nella Fig. 7.6:

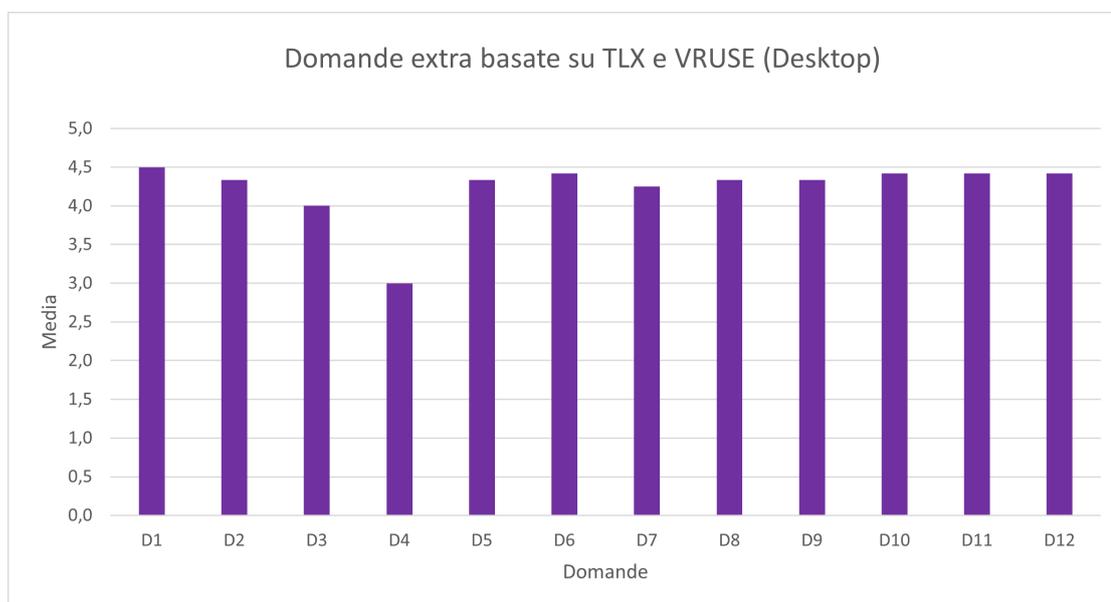


Figura 7.6: Domande Extra per versione app Desktop

Anche in questo caso l'indice di gradimento è molto alto per la maggioranza delle funzionalità all'interno dell'applicativo. In particolare, analizzando le funzionalità principali come la qualità e gestione della videochiamata, la manipolazione di un modello 3D e la condivisione interattiva degli oggetti, si nota come queste presentino tutti una media di voti superiore ai 4 punti, con gli utenti fortemente soddisfatti. E' invece possibile osservare un indice di gradimento medio-basso nella domanda dedicata all'effetto di flickering, in cui il 32.3% degli utenti si ritiene d'accordo sulla presenza di tale disturbo. Le ragioni possono essere molteplici: è plausibile che

il modello 3D, nonostante sia stato decimato e semplificato più volte, sia ancora troppo complesso e causi rallentamenti e disturbi quando è istanziato nella scena in singolo o con altri elementi. Qualora sia questa la causa del problema, per ovviare è necessario semplificare ulteriormente la geometria.

A conclusione di quest'ultima sezione di test, è importante osservare come sia per la versione dell'applicativo Pc Desktop sia per Hololens 2 si abbia una soddisfazione delle performance generali del programma superiore al 90%, con una media voti che supera i 4 punti.

Capitolo 8

Conclusioni e sviluppi futuri

Per quanto concerne le conclusioni finali, l'applicativo si è genericamente rivelato un utile strumento per il supporto alla manutenzione industriale assistita, consentendo di eseguire la procedura di assemblaggio di un macchinario industriale in Realtà Aumentata attraverso ologrammi e di replicarla contemporaneamente nel mondo fisico. La possibilità di visualizzare eventuali documentazioni online, manipolare modelli 3D verosimili e scomponibili, o effettuare una chiamata audio e video rappresentano funzionalità chiavi a supporto degli obiettivi di questo elaborato. La possibilità di avere entrambe le mani libere e riconosciute come sistema di input, unito ad un FOV decisamente migliorato rispetto alla versione precedente, rendono Hololens 2 un dispositivo all'avanguardia per lo sviluppo in Realtà Aumentata. Gli sviluppi futuri sono stati individuati considerando due fattori: la media dei risultati dei test, ponendo attenzione alle risposte con peggiore indice di gradimento, e le criticità osservate in fase di sviluppo dell'applicativo, nel rispetto delle funzionalità chiavi.

Gli elementi più critici emersi dai test riguardano i possibili effetti di flickering durante l'esecuzione del programma, la cui causa è stata individuata nel numero dei vertici che compongono i modelli 3D, giudicato troppo elevato. Il problema era già noto e si è cercato di intervenire durante la fase di sviluppo, poché causava forti rallentamenti dell'applicativo. Nonostante ciò, le operazioni eseguite e i risultati dei test mostrano come il problema non sia stato del tutto risolto. In questo caso, si ritiene opportuno, per l'ottimizzazione del sistema, la creazione di nuove geometrie più semplici al fine di garantire un programma più responsivo e fluido, mantenendo la verosimiglianza con ogni componente del macchinario originale.

Altro suggerimento per uno sviluppo futuro riguarda la chiamata audio e video. Questa, per motivi di semplicità e tempo, è stata esaminata solo mediante una rete locale, forzando gli utilizzatori a trovarsi all'interno dello stesso stabilimento o usando un indirizzo ip del server locale. In un mondo sempre più connesso nonostante le grandi distanze, con aziende che presentano sedi dislocate in diverse

aree geografiche, la possibilità di interconnettere dipendenti esperti e tecnici a prescindere dalla loro posizione locale è un valore aggiunto che estende le possibilità dell'applicativo.

Un'ultima analisi derivata dalla fase di sviluppo riguarda la scelta di rendere l'ambiente tridimensionale anche per l'utente da PC Desktop. Questa decisione si è rivelata innovativa nel campo, consentendo all'esperto di avere un ruolo attivo nell'utilizzo dell'applicativo e nella dimostrazione della procedura, ma la media dei risultati rilevati nella manipolazione ed interazione con gli oggetti 3D da Pc Desktop rispetto ad Hololens 2 porta a sostenere l'ipotesi di uno sviluppo futuro in cui entrambi gli utenti utilizzino quest'ultimo dispositivo, con un maggiore gradimento dell'esperienza. Grazie alle ultime innovazioni e ricerche recenti nel campo della Realtà Aumentata, la possibilità di un'esperienza condivisa tra più utenti tramite Hololens 2 rappresenta un'ipotesi di sviluppo concreta e molto attiva nella ricerca.

Appendice A

Questionario con test soggettivi

Sezione 1 di 8	Sezione 2 di 8
<h3>Questionario di valutazione per un applicativo di manutenzione industriale assistita in Realtà Aumentata</h3> <p>Sezione 1 con informazioni generiche obbligatorie</p>	<h3>Test di Usabilità del sistema versione Desktop</h3> <p>Le domande presenti in questa sezione sono riferite all'applicativo nella versione Computer Desktop, per l'utente esperto da remoto. Tutte le funzionalità presenti all'interno devono essere state provate (piazzamento del modello 3D, il suo assemblaggio, il reset della posizione, la distruzione, la chiamata audio e video, le impostazioni e la visione della documentazione online).</p>
<p>Età *</p> <p>Testo risposta breve</p>	<p>Ho trovato il sistema esageratamente complesso *</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Sesso *</p> <p><input type="radio"/> Donna</p> <p><input type="radio"/> Uomo</p> <p><input type="radio"/> Altro</p>	<p>Penso che vorrò utilizzare il sistema frequentemente *</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Hai mai avuto esperienze con la Realtà Aumentata? *</p> <p><input type="radio"/> Sì</p> <p><input type="radio"/> No</p>	<p>Penso che il sistema sia semplice da usare *</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Hai mai avuto esperienze con Hololens? *</p> <p><input type="radio"/> Sì</p> <p><input type="radio"/> No</p>	<p>Penso sia necessario il supporto di un tecnico per poter utilizzare il sistema *</p> <p>1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>

Questionario con test soggettivi

Ho trovato le varie funzioni ben integrate nel sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Penso vi siano troppe inconsistenze nel sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Presumo che la maggior parte degli utenti imparerà facilmente il sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Trovo il sistema molto ingombrante *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Mi sento molto sicuro nell'utilizzo del sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Ho bisogno di un tutorial prima di utilizzare il sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Sezione 3 di 8

Test di Usabilità del sistema versione Hololens 2

Le domande presenti in questa sezione sono riferite all'applicativo nella versione Hololens 2, per l'utente tecnico in loco. Tutte le funzionalità presenti all'interno devono essere state provate (piazamento del modello 3D, il suo assemblaggio, il reset della posizione, la distruzione, la chiamata audio e video, l'opzione 'seguimi', le impostazioni e la visione della documentazione online).

Ho trovato il sistema esageratamente complesso *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Penso che vorrò utilizzare il sistema frequentemente *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Penso che il sistema sia semplice da usare *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Penso sia necessario il supporto di un tecnico per poter utilizzare il sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Ho trovato le varie funzioni ben integrate nel sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Penso vi siano troppe inconsistenze nel sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Presumo che la maggior parte degli utenti imparerà facilmente il sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Trovo il sistema molto ingombrante *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Mi sento molto sicuro nell'utilizzo del sistema *					
	1	2	3	4	5
Fortemente in disaccordo	<input type="radio"/>				
					Fortemente d'accordo

Questionario con test soggettivi

Sezione 4 di 8

Test Qualitativo del sistema versione Holens 2 - Pre utilizzo

Questa sezione raccoglie i dati relativi alla possibile "cyber sickness" del soggetto durante l'utilizzo del caschetto per la realtà aumentata, analizzando le sue condizioni fisiche e psichiche. In questa sezione è presente il test che considera le condizioni del soggetto precedenti all'utilizzo dell'applicativo.

Sconforto generico *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Mal di testa *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Affaticamento degli occhi *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Stanchezza *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Ho bisogno di un tutorial prima di utilizzare il sistema *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Difficoltà di messa a fuoco *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Eccessiva salivazione *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Sudorazione *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Nausea *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Difficoltà a concentrarsi *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Visione offuscata *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Vertigini con occhi aperti *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Vertigini con occhi chiusi *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Mal di stomaco *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Sezione 5 di 8

Test Qualitativo del sistema versione Hololens 2 - Post utilizzo

Questa sezione raccoglie i dati relativi alla possibile "cyber sickness" del soggetto durante l'utilizzo del caschetto per la realtà aumentata, analizzando le sue condizioni fisiche e psichiche. In questa sezione è presente il test che considera le condizioni del soggetto successive all'utilizzo dell'applicativo.

Sconforto generico *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Mal di testa *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Affaticamento degli occhi *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Stanchezza *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Difficoltà di messa a fuoco *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Eccessiva salivazione *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Sudorazione *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Nausea *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Difficoltà a concentrarsi *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Visione offuscata *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Vertigini con occhi aperti *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Vertigini con occhi chiusi *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Mal di stomaco *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Sezione 6 di 8

Domande extra basate su TLX e VRUSE

Versione App Hololens 2

Ho trovato il sistema di videochiamata semplice da utilizzare *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

L'audio della chiamata permette una comunicazione chiara *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Il video durante la chiamata è sempre ad un framerate accettabile *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

L'effetto di flickering è molto presente *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Questionario con test soggettivi

<p>Il dispositivo è comodo da indossare * :::</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Le parole o simboli mostrati nel display sono facili da leggere *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>La condivisione degli oggetti 3D facilita la comunicazione e il passaggio di informazioni *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Ho trovato il dispositivo di input facile da usare (gesture e bottoni) *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>La scena virtuale presenta troppi elementi tali da rendere impossibile operare sul modello reale *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Le funzioni possibili attraverso l'interazione con i bottoni sono chiare e comprensibili *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Sarei in grado di assemblare l'elettromandrino anche senza la videochiamata, sfruttando i suggerimenti presenti su ogni pezzo del modello *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Il campo visivo (FOV) di visualizzazione era appropriato per le procedure *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>La funzione di Visualizzazione Scomposta consente una visione chiara di ogni componente presente nell'elettromandrino *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Ho trovato facile manipolare gli oggetti nell'ambiente *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>

<p>Quando spostavo la testa la qualità dell'immagine era accettabile *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<div style="background-color: #e0e0e0; padding: 2px;">Sezione 7 di 8</div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> <p style="margin: 0;">Domande extra basate su TLX e VRUSE ⌵ ⋮</p> <p style="margin: 0; font-size: small;">Versione App Desktop</p> </div>
<p>Navigare nell'ambiente virtuale è stato intuitivo *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Ho trovato il sistema di videochiamata semplice da utilizzare *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Sono soddisfatto delle performance generali dell'applicazione (framerate, responsività) *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>L'audio della chiamata permette una comunicazione chiara *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Reputo molto utile la possibilità di avere entrambe le mani libere per poter effettuare altre operazioni nel contesto reale *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>Il video durante la chiamata è sempre ad un framerate accettabile *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>
<p>Utilizzerei questo sistema rispetto ad uno tradizionale (pc/tablet, pc/smartphone, pc/pc) *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>	<p>L'effetto di flickering è molto presente *</p> <p style="text-align: center;">1 2 3 4 5</p> <p>Fortemente in disaccordo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Fortemente d'accordo</p>

La condivisione degli oggetti 3D facilita la comunicazione e il passaggio di informazioni *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

La funzione di Visualizzazione Scomposta consente una visione chiara di ogni componente presente nell'elettromandrino *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Ho trovato facile manipolare gli oggetti nell'ambiente *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Le parole o simboli mostrati nel display sono facili da leggere *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Navigare nell'ambiente virtuale è stato intuitivo *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Ho trovato il dispositivo di input facile da usare (gesture e bottoni) *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Sono soddisfatto delle performance generali dell'applicazione (frame rate, responsività) *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Le funzioni possibili attraverso l'interazione con i bottoni sono chiare e comprensibili *

1 2 3 4 5

Fortemente in disaccordo Fortemente d'accordo

Bibliografia

- [1] Heiner Lasi, Peter Fettke, Hans-Georg Kempera e Thomas Feld Michael Hoffmann. *Industry 4.0*. 2014. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12599-014-0334-4> (cit. a p. 4).
- [2] Ministero dello Sviluppo economico. *Centri di competenza ad alta specializzazione*. 2018. URL: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/incentivi/impresa/centri-di-competenza> (cit. a p. 6).
- [3] CIM 4.0. URL: <https://cim40.com/> (cit. a p. 6).
- [4] Paul Milgram e Fumio Kishino. *A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays*. 1994. URL: <https://tinyurl.com/ycksw36b> (cit. a p. 7).
- [5] Khullani M. Abdullahi. *The Reality-Virtuality Continuum*. 2016. URL: <https://tinyurl.com/7ymrju93> (cit. a p. 7).
- [6] Mark Billinghurst. *Introduction to Augmented Reality*. 2004. URL: <https://tinyurl.com/3b85hp6h> (cit. a p. 7).
- [7] Ronald T. Azuma. *A Survey of Augmented Reality*. 1997. URL: <https://www.cs.unc.edu/~azuma/ARpresence.pdf> (cit. alle pp. 7, 11, 13, 25).
- [8] Louis B. Rosenberg. *The use of virtual fixtures as perceptual overlays to enhance operators performance in remote environments*. 1992. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a292450.pdf> (cit. a p. 8).
- [9] L.B. Rosenberg. *Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation*. 1993. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/380795> (cit. a p. 8).
- [10] Louis B. Rosenberg. *The use of virtual fixtures to enhance operator performance in time delayed teleoperation*. 1993. URL: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a296363.pdf> (cit. a p. 9).
- [11] Mehdi Mekni e Andre Lemieux. *Augmented Reality: Applications, Challenges and Future Trends*. 2014. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2014/Malaysia/ACACOS/ACACOS-29.pdf> (cit. a p. 9).

- [12] Damla Aslana, Bengü Bayyurt Çetin e alzzet Gökhan Özbilgin. *An Innovative Technology: Augmented Reality Based Information Systems*. 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919312293> (cit. alle pp. 9, 10, 12).
- [13] T.P. Caudell e D.W. Mizell. *Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes*. 2002. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/183317> (cit. alle pp. 10, 12, 15).
- [14] G.Reinhart e C.Patron. *Integrating Augmented Reality in the Assembly Domain - Fundamentals, Benefits and Applications*. 2003. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850607605174> (cit. a p. 10).
- [15] ETHW. *Tracking the Ice Hockey Puck*. 2015. URL: [https://ethw.org/Tracking_the_Ice_Hockey_Puck_-_FoxTrax_\(Glow_Puck\)](https://ethw.org/Tracking_the_Ice_Hockey_Puck_-_FoxTrax_(Glow_Puck)) (cit. a p. 11).
- [16] Arthur Tang, Charles Owen, Frank Biocca e Weimin Mou. *Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly*. 2003. URL: <https://experts.syr.edu/en/publications/comparative-effectiveness-of-augmented-reality-in-object-assembly> (cit. a p. 12).
- [17] R. Palmarini, J. A. Erkoyuncu, R. Roy e H. Torabmostaedib. *A systematic review of augmented reality applications in maintenance*. 2018. URL: <https://tinyurl.com/3k3s39ah> (cit. a p. 13).
- [18] S. K. Ong, M. L. Yuan e A. Y. C. Nee. *Augmented reality applications in manufacturing: a survey*. 2008. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016342562> (cit. a p. 15).
- [19] A.Y.C.Nee e S.K.Ong. *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*. 2013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016342562> (cit. a p. 16).
- [20] D. Mourtzis, V. Siatras e J. Angelopoulos. *Real-Time Remote Maintenance Support Based on Augmented Reality*. 2020. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/5/1855/html> (cit. a p. 16).
- [21] James Bourne. *BMW looking to augmented reality for maintenance and manufacturing repairs*. 2020. URL: <https://virtualreality-news.net/news/2019/jun/14/bmw-looking-augmented-reality-maintenance-and-manufacturing-repairs/> (cit. a p. 17).
- [22] Chris Bruce. *Tesla uses augmented reality to improve EV manufacturing*. 2016. URL: <https://tinyurl.com/yckpamn9> (cit. a p. 17).
- [23] Siemens Press. *Augmented reality in the workplace – Work 4.0: Intelligent data glasses support production*. 2019. URL: <https://press.siemens.com/global/en/news/augmented-reality-workplace> (cit. a p. 17).

-
- [24] Microsoft. *Business-ready solutions for HoloLens 2*. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/apps> (cit. a p. 17).
- [25] Microsoft. *Overview of Dynamics 365 Guides*. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/> (cit. a p. 18).
- [26] Microsoft. *Overview of Dynamics 365 Remote Assist*. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/remote-assist/ra-overview> (cit. alle pp. 18, 24).
- [27] PTC: Vuforia. *Vuforia Chalk: Remote Assistance Powered by Augmented Reality*. URL: <https://www.ptc.com/en/products/vuforia/vuforia-chalk> (cit. a p. 20).
- [28] PTC: Vuforia. *Howden Creates Mixed Reality Solutions to Enhance Customer Experience*. URL: <https://www.ptc.com/en/case-studies/howden-mixed-reality> (cit. a p. 21).
- [29] R. Keith Mobley. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2002. URL: <https://tinyurl.com/yckpamn9> (cit. a p. 22).
- [30] Sigga Technologies. *What is the Importance of Maintenance in Industry?* URL: <https://www.sigga.com/blog/importance-industrial-maintenance> (cit. a p. 24).
- [31] J. Carmigniani e B. Furht. *Augmented Reality: An Overview*. 2011. URL: <http://pire.fiu.edu/publications/Augmented.pdf> (cit. a p. 25).
- [32] J. Langston. *New HoloLens 2 gives Microsoft the edge in the next generation of computing*. 2019. URL: <https://news.microsoft.com/innovation-stories/hololens-2/> (cit. a p. 27).
- [33] Microsoft. *About HoloLens 2: Hardware*. URL: <https://docs.microsoft.com/it-it/hololens/hololens2-hardware> (cit. a p. 27).
- [34] Microsoft. *Microsoft HoloLens*. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/> (cit. a p. 31).
- [35] E. Lazer-Walker. *HoloLens 2 Mixed Reality Production for Unreal Engine*. URL: <https://techcommunity.microsoft.com/t5/mixed-reality-blog/hololens-2-mixed-reality-production-for-unreal-engine/ba-p/3028444> (cit. a p. 31).
- [36] SKF. *Revisione mandrini ed elettromandrini per macchine utensili*. URL: <https://www.skf.com/it/organisation/skf-italia/servizi-della-skf-solution-factory/Revisione-mandrini-ed-elettromandrini> (cit. a p. 49).