



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica

**Tracking e Mixed Reality: sviluppo di
un'applicazione per il supporto degli operatori
in postazioni di assemblaggio**

Tracking and Mixed Reality: development of an
application to support operators in assembly stations

Relatore:

Prof. Michele Germani

Tesi di laurea di:

Matteo Carmenati

Correlatore:

Ing. Agnese Brunzini

Ing. Mikhailo Sartini

I. Sommario

I. Sommario	1
II. Elenco delle figure	2
III. Elenco delle tabelle	3
1 Introduzione	4
2 Background e Stato dell'arte	8
2.1 Sistemi di tracking	8
2.2 Letteratura scientifica	16
3 Metodo	22
3.1 Introduzione ad Unity e MRTK	22
3.2 Azure Spatial Anchor	24
3.3 Visual Studio	26
3.4 Microsoft Hololens 2	27
4 Caso studio	31
5 Risultati e discussione	46
5.1 Confronto modelli	46
5.2 User Experience Questionnaire	47
5.3 Mixed Reality User Experience	53
6 Sviluppi futuri	55
7 Conclusioni	57
8 Bibliografia	60

II. Elenco delle figure

Figura 2.1: Virtuality Continuum	13
Figura 2.2: Gameplay AR Quake	19
Figura 3.1: Logo Unity	22
Figura 3.2: MRTK-Unity	23
Figura 3.3: Azure Spatial Anchor	25
Figura 3.4: ParentAnchor in Unity	26
Figura 3.5: Vista frontale Microsoft Hololens 2	28
Figura 3.6: Vista laterale Microsoft Hololens 2	28
Figura 3.7: Hardware Hololens 2	29
Figura 4.1: Nuovo progetto Unity	32
Figura 4.2: Configurazione MRTK	33
Figura 4.3: ButtonParent	35
Figura 4.4: DebugWindow e Instruction	36
Figura 4.5: Tasti Create e Find Anchors	38
Figura 4.6: Codici button cambiati	39
Figura 4.7: SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk	40
Figura 4.8: GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk	40
Figura 4.9: Eventi modificati	41
Figura 4.10: Istruzione per operatore	42
Figura 4.11: Distribuzione istruzioni nella scena Unity	42
Figura 4.12: Visual Studio	43
Figura 4.13: Impostazioni per distribuzione applicazione	43
Figura 4.14: Visualizzazione della scena tramite Microsoft Hololens 2	44
Figura 4.15: Ancoraggi posizionati sopra la trasmissione da cablare	45

III. Elenco delle tabelle

Tabella 1: Confronto modello paper based e applicazione	46
Tabella 2: User experience questionnaire	48
Tabella 3: Risultati UEQ Paper Based	48
Tabella 4; Risultati UEQ per Applicazione di MR.....	49
Tabella 5: Risultati analisi dell'UEQ per il modello paper based.....	49
Tabella 6: Risultati analisi UEQ per Applicazione MR	50
Tabella 7: Analisi metodo paper based	51
Tabella 8: Analisi metodo MR	52
Tabella 9: MR User Experience e risultati.....	53

1 Introduzione

Con l'avvento dell'industria 4.0, sempre più si va verso l'idea di "smart factory", ovvero di fabbrica intelligente all'interno della quale lo sviluppo delle nuove tecnologie viene sfruttato per l'ottimizzazione dei processi produttivi, ma anche per la manutenzione, sicurezza sul lavoro e il controllo qualità.

I vantaggi connessi alle nuove tecnologie si riscontrano soprattutto nella capacità di connettere fra di loro diversi sistemi e dispositivi, permettendo di acquisire dati utili per garantire un accurato livello di monitoraggio e di gestione dei processi.

Un ruolo chiave, pertanto, è costituito dalla creazione di sistemi per la Mixed Reality (Realtà Mista, MR). La realtà mista è una tecnologia destinata a rivoluzionare completamente scenari e processi appartenenti alla vita di tutti i giorni. Questa nuova tecnologia permette di interpretare il mondo reale attraverso dispositivi di acquisizione, sia fissi che indossabili, arricchendolo con informazioni e dettagli altrimenti non visibili agli utenti.

Quando si parla di mixed reality è importante introdurre due concetti fondamentali, quello dell'Augmented Reality (in italiano realtà aumentata, abbreviato anche in AR) e quella della Virtual Reality (realtà virtuale o VR). Partendo da quest'ultima, per realtà virtuale (VR) ci riferiamo ad un ambiente circostante tridimensionale, non reale, ma simulato, in cui l'utente è in grado di interagire grazie alla combinazione di dispositivi hardware e software che offrono un'esperienza totalmente immersiva.

La realtà aumentata (AR) è una tecnologia in grado di aggiungere alla realtà esistente informazioni rilevanti generate dal computer con cui l'utente può interagire. Questo significa che l'esperienza che si vive non è totalmente immersiva e a differenza della realtà virtuale si utilizzano dispositivi tecnologici di uso quotidiano come smartphone, laptop, tablet o occhiali di realtà aumentata.

Ciò che si trova tra la realtà aumentata e quella virtuale è definita realtà mista. Nella realtà mista gli oggetti non vengono semplicemente sovrapposti alla realtà circostante, ma vengono ancorati ad essa, in modo che l'utente possa interagirvi, creando un'esperienza molto dinamica.

Proprio sulla Mixed Reality, come richiesto da CNH Industrial, azienda leader in Italia nel settore dei macchinari agricoli, e in particolare sullo sviluppo di un'applicazione di realtà mista, si incentra il lavoro di tesi svolto, con l'obiettivo di creare uno strumento di supporto all'operatore che fornisca un miglioramento della qualità e delle tempistiche del processo produttivo, e nel caso specifico, una miglioria della fase di cablaggio della trasmissione dei macchinari agricoli, attraverso la visualizzazione delle istruzioni per il montaggio nell'ambiente circostante sotto forma di ologrammi.

Questa scelta è dovuta all'ottimo livello che già è stato raggiunto dalla mixed reality e alla futuribilità che questo progetto può assumere e alle migliorie che si possono ottenere, visto che soprattutto in ambito industriale questa tecnologia sta prendendo sempre più piede e le soluzioni presenti migliorano di anno in anno. Altre richieste che hanno portato al conseguimento di questo studio erano legate alla necessità di uno strumento che rendesse le istruzioni visualizzate dall'operatore più chiare e facilmente comprensibili, andando ad aggiungere anche immagini e video, come vedremo nei capitoli successivi, che vadano ad apportare un'ulteriore assistenza a chi poi dovrà eseguire i cablaggi. Inoltre, con questa soluzione sono stati limitati anche gli spostamenti che l'operatore necessita di fare attualmente per consultare le istruzioni paper based, stimando anche un leggero miglioramento dello stress fisico, visto che con questa tecnologia sono sempre visualizzabili in punti di interesse prestabiliti, senza però avere un intralcio visivo durante le operazioni di montaggio.

Come già detto, la realtà mista fonde elementi del mondo reale a elementi del mondo digitale, così che si possa interagire sia con il mondo virtuale che con ciò che realmente ci circonda. Per ottenere questo tipo di interazione vengono utilizzati sistemi indossabili, e in particolare sempre più stanno prendendo piede i visori olografici o di realtà aumentata. Nel nostro caso si è optato per l'utilizzo dei Microsoft HoloLens 2, visori olografici di ultima generazione, sviluppati da Microsoft e Microvision Inc., nei quali poi è stata distribuita, con Visual Studio, l'applicazione di realtà mista sviluppata.

Per la creazione dell'applicazione si è utilizzato il software Unity e il pacchetto Mixed Reality ToolKit (MRTK) per Unity, mentre per il tracking delle informazioni olografiche si è utilizzato Azure Spatial Anchor (ASA).

Unity è un motore grafico multiplatforma sviluppato da Unity Technologies che consente lo sviluppo di videogiochi e altri contenuti interattivi, quali visualizzazioni architettoniche o animazioni 3D in tempo reale.

MRTK per Unity è un kit di sviluppo multiplatforma open source per applicazioni di realtà mista, che permette la manipolazione degli oggetti riportati in scena e offre componenti fondamentali e librerie predefinite per le interazioni spaziali.

Azure Spatial Anchor, attraverso le "ancore", permette di collocare e localizzare contenuti digitali persistenti nella stessa posizione fisica. Un aspetto fondamentale di ASA, oltre alla persistenza delle informazioni digitali, è la possibilità di renderle visibili solo agli utenti a cui risultano funzionali. Questo permette di creare un ambiente di lavoro libero da eventuali possibili intralci visivi e fisici, ma con tutte le informazioni necessarie ad eseguire un'adeguata lavorazione. Quindi fondamentale per un buon tracciamento delle ancore, e di conseguenza una precisa e adeguata visualizzazione delle informazioni, è la mappatura dell'ambiente di lavoro. In questa specifica situazione è eseguita dal visore, attraverso un complesso sistema di sensori. Con gli HoloLens 2, che utilizzano sensori di profondità time-of-flight da 1 MP per il mapping dell'ambiente, è importante considerare la tipologia di superficie da riconoscere, in quanto superfici lucide e riflettenti spesso causano interferenze che comportano misurazioni non del tutto esatte.

Una volta fatte tutte le dovute considerazioni riguardo all'ambiente in cui dovrà operare l'utente e avviata l'applicazione all'interno dei Microsoft HoloLens 2, la scena creata in Unity dovrà essere settata nello specifico spazio di lavoro, con la massima precisione, per ottenere un adeguato tracciamento delle informazioni. L'obiettivo finale è quindi di ottenere un miglioramento della qualità e delle tempistiche della produzione, abbassandone le quantità di parti mal eseguite durante le fasi di montaggio.

2 Background e Stato dell'arte

2.1 Sistemi di tracking

La definizione più generale di tracking è la seguente: Un dispositivo di tracking è quel sistema che, grazie a sensori di varia natura, permette di conoscere la posizione e l'orientazione di un oggetto nello spazio e nel tempo.

Il problema del rilievo di forma è uno dei maggiormente affrontati in ambito industriale e non, in quanto si possono utilizzare numerose soluzioni basate su principi diversi. I dispositivi di motion tracking 3D possono essere classificati in base alla tecnologia utilizzata per la misurazione: meccanici, elettromagnetici, ottici, acustici ed inerziali.

Per ciascuno i parametri di lavoro sono i seguenti:

- Volume di lavoro: definisce la regione di spazio in cui il sistema lavora correttamente.
- Frequenza di campionamento: la frequenza con cui il calcolatore rileva e aggiorna le variabili.
- Risoluzione: la più piccola variazione di posizione rilevata.
- Latenza: il tempo trascorso dall'evento al suo riconoscimento, ovvero la rapidità di risposta.
- Precisione: l'entità dell'errore di misurazione.

Sistemi meccanici: sistemi meccanici a bracci, che utilizzano potenziometri o encoder ottici per misurare la rotazione dei perni di vincolo delle aste di collegamento. Noti gli angoli di ciascun giunto e le lunghezze delle aste della catena cinematica, è possibile calcolare con facilità la posizione dell'oggetto tracciato.

Vantaggi:

- Grande precisione
- Bassissima latenza

Svantaggi:

- Ingombranti
- Range di movimento limitato

Sistemi elettromagnetici: sistemi costituiti da un trasmettitore e da un ricevitore. Il trasmettitore genera un campo magnetico fluttuante mediante tre spire tra loro ortogonali, che è rilevato da tre simile spire nel ricevitore.

Vantaggi:

- Dimensioni ridotte, poco ingombranti
- Elevata comodità
- Possibilità di utilizzare più ricevitori

Svantaggi:

- Sensibili alle interferenze elettromagnetiche e ferromagnetiche
- Lentezza nella risposta

Sistemi acustici: un emettitore genera un segnale sonoro e un microfono lo raccoglie misurando il tempo impiegato dal suono per percorrere il cammino (chiamato tempo di volo o TOF). Un elaboratore raccoglie i dati di più dispositivi e calcola la posizione e l'orientamento.

Vantaggi:

- Economici
- Facile reperibilità

Svantaggi:

- La velocità del suono varia con le condizioni ambientali, bassa precisione
- Volume di funzionamento limitato

Sistemi inerziali: si utilizzano giroscopi, accelerometri e inclinometri per misurare cambiamenti di posizione e rotazione in un sistema inerziale.

Vantaggi:

- Non sono necessari sistemi di trasmissione-ricezione
- Piccole dimensioni
- Assenza di interferenze
- Bassa latenza

Svantaggi:

- Elevati costi
- Errore cumulativo
- Necessità di ricalibrazione
- Sensibilità alla temperatura

Sistemi ottici: i sistemi di tracciamento ottici sono caratterizzati da un'elevata accuratezza, ma anche da notevole complessità e costo. Il sistema è costituito da sorgenti luminose disposte sull'oggetto da tracciare e da telecamere che ne rilevano la posizione. Solitamente si utilizzano sorgenti ad infrarossi perché sono invisibili e quindi non creano confusione all'utente. Questo tipo di sistemi si sta sempre più diffondendo grazie ad un ottimo rapporto precisione-prezzo

Vantaggi:

- Accuratezza
- Relativamente economici
- Non ingombranti
- Possibilità di tracking di tutto il corpo
- Gestione di grandi aree di lavoro

Svantaggi:

- Calcoli più complessi e da fare in tempo reale
- Sensibile a illuminazione
- Non ci devono essere occlusioni o auto-occlusioni

Approccio image-based

Con questo tipo di approccio cambia il concetto di tracking. Il tracciamento non è più legato all'intercettazione dei segnali trasmittente e ricevente, bensì sul riconoscimento di speciali figure (marker).

Da essi si ricava un punto di riferimento per la scena inquadrata, sulla base del quale inserire i contenuti aumentanti. Il più grande vantaggio è il costo basso della stampa dei marker e di una camera per le acquisizioni delle scene osservate.

Inoltre, si possono trovare numerose librerie open-source, come ARToolkit, orientate proprio allo sviluppo di applicazioni di realtà aumentata marker-based.

I marker sono delle speciali figure che il sistema intercetta e traccia all'interno di un flusso video proveniente da una camera. Un marker ha dei vincoli precisi:

- Deve essere perfettamente quadrato con delle proporzioni ben definite.
- I bordi esterni devono essere ben delineati e privi di interruzioni.
- L'immagine interna al marker deve essere completamente asimmetrica. Ciò è fondamentale affinché la detection sul suo orientamento non si ambigua.
- Le immagini interne ai marker devono essere fortemente disaccoppiate. Quando un marker si allontana dalla camera, il numero di pixel per discriminarlo dagli altri diminuisce e se due marker hanno una forte correlazione, l'identificazione può creare ambiguità.

Sebbene l'abbattimento dei costi sia un dato molto importante bisogna fare delle considerazioni su alcune limitazioni che si possono incontrare con questa tipologia di strumentazione:

- Il tracciamento è possibile fintanto che il marker risulta inquadrato dalla camera, quindi si necessita di un'ampia focale della camera.
- Il flusso video della camera deve essere privo di noise.
- -La frequenza di campionamento della camera deve essere elevata (almeno 30 fps), per avere un tracciamento senza interruzioni.

Tuttavia alcune di queste limitazioni sono superabili, attraverso l'approccio multi-marker, con l'utilizzo di più marker contemporaneamente, di cui è nota la posizione dell'uno rispetto all'altro. Contando sulla presenza di più marker il sistema è in grado di assicurare un più fedele tracciamento, in quanto uno o più marker verranno sempre inquadrati dalla camera. Per giunta se il sistema compie un errore di detection (ombre, noise, occlusioni, ecc.), la presenza di altri marker può compensare l'errore, aumentando di gran lunga la precisione del tracciamento.

Approcci ibridi

Tutte le tecnologie mostrate finora presentano delle limitazioni e dei punti di forza.

Proprio per questo, la ricerca si è sempre più spinta verso soluzioni ibride al fine di combinare i vantaggi dei diversi approcci. Un esempio è l'elevato utilizzo di tecnologia multi-marker combinata con giroscopi, accelerometri che calcolano e prevedono spostamenti e posizionamenti, così da sopperire ad eventuali errori di detection della camera.

Va comunque sempre tenuto in considerazione, non solo l'eventuale vantaggio tecnico, ma anche quello economico di queste tecnologie ibride.

Approccio markerless

Negli ultimi anni sta sempre più prendendo piede l'approccio markerless, ovvero senza tracciamento di figure.

Ci sono circostanze in cui la presenza di un marker potrebbe creare dei problemi (estetici, impossibilità ad incollarli sulla superficie, ecc.). L'impatto che ha una soluzione markerless su un ambiente di lavoro è praticamente nullo, sebbene il riconoscimento degli oggetti diventi più complicato.

Uno degli esempi più noti di tecnologia di tracciamento senza l'utilizzo di figure è il Microsoft Kinect. Delle speciali depth-camera riconoscono e tracciano i movimenti dell'utente in uno spazio di lavoro limitato.

Un altro approccio markerless che sempre più sta prendendo piede, e che è stato utilizzato nello sviluppo del progetto di tesi svolto, è appunto quello della Mixed Reality.

Prima di parlare di Mixed Reality, è utile introdurre il concetto di Augmented Reality o in italiano Realtà Aumentata: con quest'ultima si intende l'arricchimento della percezione sensoriale umana mediante informazioni, in genere manipolate e convogliate elettronicamente, che non sarebbero percepibili con i soli cinque sensi.

Esistono diverse forme di Realtà Aumentata, ed ancora meglio la Realtà Aumentata è a sua volta una modulazione della più ampia Mixed Reality.



Figura 2.1: Virtuality Continuum

La MR è l'insieme che raggruppa tutti i possibili sistemi che vanno dall'ambiente puramente reale all'ambiente completamente virtuale. Tali sistemi sono riconducibili in quattro forme principali:

- Real Environment cioè l'ambiente reale, senza nessun apporto di contenuti virtuali;
- Virtual Environment, è quell'ambiente in cui sono presenti solo elementi virtuali, senza connessioni dirette con l'ambiente reale;
- Augmented Reality (AR) comprende tutti quei casi in cui l'ambiente reale viene "aumentato" tramite la sovrapposizione di oggetti virtuali. Gli attuali sviluppi di

quest'area puntano principalmente all'utilizzo di Head Mounted Display (display indossati dall'operatore) in ambiente industriale, ed al cellulare in ambiente consumer, con il fine di sovrapporre fisicamente le informazioni virtuali alle immagini del Real Environment;

- Augmented Virtuality (AV) racchiude tutti quei sistemi o dispositivi che aggiungono, su base virtuale, immagini o oggetti presi dall'ambiente reale. Questa suddivisione, che è una via di mezzo tra la pura virtualizzazione e l'AR, è stata resa necessaria dall'avanzamento tecnologico in campo della simulazione ottica e sensoristica, in generale.

In conclusione, la Mixed Reality comprende tutti quei casi in cui, ambiente reale ed ambiente virtuale, hanno un qualche tipo di interazione. L'identificazione della categoria di interesse avviene principalmente valutando le tecnologie utilizzate, quindi le caratteristiche di implementazione e le relative funzionalità. Volendo approfondire le peculiarità dell'Augmented Reality, è possibile ricondurle al seguente elenco:

- uno sfondo, tipicamente ripreso da fotocamere o altri dispositivi di capture image, su cui poi viene inserita la struttura virtuale;
- un sistema di tracking il quale serve ad allineare, in tempo reale, gli oggetti virtuali alle immagini reali (capacità di un elemento di stabilire un riferimento spaziale tra l'immagine video ed il modello virtuale 3D);
- avere oggetti bidimensionali o tridimensionali, nel caso in cui si voglia sfruttare la profondità dell'immagine o l'orientamento dello stesso oggetto;
- non limitare i sensi dell'utente, anzi aumentarli arricchendoli di contenuti;
- utilizzare un sistema di visualizzazione che permetta la riproduzione dell'AR, o meglio, dell'unione fra i due ambienti (virtuale e reale), facendo in modo da non ridurre, ad esempio, il campo visivo dell'utilizzatore.

Il primo vantaggio è sicuramente quello di avere informazioni contestuali, esattamente dove e quando servono, migliorando la capacità di interpretare il contesto reale e semplificando la lettura di informazioni di natura digitale. Attivare forme davvero avanzate di collaborazione da remoto, con la possibilità di scambiarsi informazioni sulle procedure e registrare la sequenza delle attività. È possibile monitorare un processo produttivo, migliorandolo e agendo tempestivamente in caso di fault, per prevenire o predire eventuali anomalie, efficientandolo nel complesso. Un ulteriore aspetto positivo di questa tecnologia è la possibilità di utilizzarla per la formazione, sia negli ambiti lavorativi tanto quanto in quello scolastici.

Gli aspetti negativi, soprattutto in ambito industriale, sono legati all'utilizzo di device che non disturbino la manualità e la mobilità dell'utente ed inoltre che non vadano a stressare ulteriormente la salute psico-fisica dell'operatore, già sottoposta a stress dall'orario lavorativo e dalle lavorazioni da eseguire. Sotto questo punto di vista, sempre più si stanno apportando delle migliorie per consentire una facile e poco faticosa esperienza.

2.2 Letteratura scientifica

La realtà aumentata è in costante sviluppo e le aziende ormai da tempo la sfruttano per migliorare la produttività o per istruire i dipendenti. L'idea di impiegare l'AR in ambito industriale non è affatto una novità. Ebbe inizio agli albori della computer grafica quando verso la fine degli anni '60 Ivan Sutherland condusse una ricerca sui visori Head Mounted Display (HMD) (Sutherland, 1968) presso l'università di Harvard e dell'Utah. Un computer collegato all'HMD elabora ed arricchisce in tempo reale l'immagine reale ponendo in sovrapposizione informazioni di tipo digitale.

Negli anni '70 e negli anni '80 un gruppo di ricercatori studiò come utilizzare le tecnologie per AR presso il laboratorio Armstrong dell'USAF, centro di ricerca della NASA Ames e l'università della Carolina del nord. Il termine Augmented Reality viene introdotto solo negli anni '90 da due ricercatori dei laboratori della Boeing, Tom Caudell e David Minzell. In questo progetto, mai realizzato, gli operai che lavoravano agli aerei avrebbero indossato un visore che mostrava loro come posizionare i cavi all'interno della struttura. La documentazione fu presentata durante la venticinquesima edizione della Hawaii International Conference on System Science [1].

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

Un autore molto conosciuto in questo campo, nonché uno dei primi ad analizzare e classificare le varie forme di AR, è stato R.T. Azuma. L'autore in "A Survey of Augmented Reality"[2] ha definito, descritto ed illustrato molte applicazioni note all'epoca, classificandone vantaggi e carenze. Secondo Azuma esistono principalmente due tipologie di combinazione degli ambienti reali e virtuali, le quali dividono il campo dell'AR in due categorie: tramite utilizzo dell'ottica o tramite tecnologia video. Per quanto riguarda l'utilizzo della tecnologia video, questa, di solito sfrutta due fotocamere 19 che lavorano in simultanea, per catturare la visione dell'operatore e trasmetterla ad un sistema di elaborazione che fa il merging con il l'ambiente virtuale. Successivamente l'utilizzatore riceve le immagini di AR tramite un display, che può anche essere montato in un HMD.

Per quanto riguarda la tecnologia ottica, generalmente, comporta una riduzione della luce ricevuta da parte dell'utilizzatore, questo perché non sfruttata veri e propri display, ma suoi sostituti: vengono adoperati display semi-trasparenti che riducono la luce incidente sull'occhio (in genere la riduzione di luminosità dipende dall'angolo di inclinazione del dispositivo e/o dalla sua trasparenza). Caso particolare riguarda la tecnologia chiamata Projection Display [3].

Nel 1993, è stata proposta da Steven K. Feiner insieme ai suoi collaboratori un prototipo che usava HMD per il supporto durante la manutenzione di una stampante laser introducendo così il concetto di realtà aumentata di conoscenza per l'assistenza alla manutenzione KARMA (Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance) [4][5].

In questo caso si sfruttarono tracker acustici, ovvero tracker che usano ultrasuoni a bassa frequenza, per determinare la posizione e orientamento dell'utente. Il sistema prevede un visore see-through e supporta solo primitive come linee o poligoni e testo e aggiornava le immagini 3D in base al movimento dell'utente.

Il termine Realtà mista è stato introdotto in un documento del 1994 di Paul Milgram e Fumio Kishino, "A Taxonomy of Mixed Reality Visual Display" [6]. Il documento ha esplorato il concetto di continuità virtuale e la tassonomia degli schermi visivi. Da quel momento in poi, l'applicazione della realtà mista è andata oltre i dispositivi di visualizzazione per includere:

- Comprensione dell'ambiente: mapping spaziale e ancoraggi.
- Comprensione umana: tracciamento delle mani, tracciamento oculare e input vocale.
- Audio spaziale.
- Posizioni e posizionamento in spazi fisici e virtuali.
- Collaborazione su asset 3D in spazi di realtà mista.

Nel 1995 Whitaker Ross insieme ad altri ricercatori proposero un sistema per visualizzare il nome della parte di un motore indicata dall'utente [7].

Mentre finora la Realtà Aumentata era considerata fruibile solo nei laboratori, nel 1999, Irokazu Kato e Mark Billinghurst svilupparono e rilasciarono la libreria ARToolkit per programmare realtà aumentata con dei fiducial marker quadrati e dalla grafica elementare. Questo può essere considerato l'anno di svolta della AR per le numerose applicazioni che da ora in poi verranno realizzate con ARToolkit.

Questo porta molti programmatori ad avvicinarsi alla realtà aumentata e a sviluppare nuove soluzioni. Nel 2000 si ha il primo esempio con AR Quake di Bruce H. Thomas.

Il sistema realizzato comprendeva diversi oggetti: un computer (tenuto in uno zaino), un giroscopio, un sensore, un GPS e un Head-Mounted display. Tratto dall'omonimo sparatutto il sistema consente di ripercorrere i labirinti del gioco originale nel mondo reale.



Figura 2.2: Gameplay AR Quake

Fin da quando la tecnologia ha reso possibile l'utilizzo di forme di AR in contesti applicativi reali, diverse innovative soluzioni hanno migliorato tale fruibilità. In questo caso viene affrontato lo sviluppo dell'AR e della MR in ambito industriale, ma da sempre viene molto utilizzata anche nei campi medico, militare e negli ultimi decenni anche nell'intrattenimento e nel commerciale.

Nel contesto industriale l'utilizzo di questa forma di tecnologia è stato ampiamente analizzato e prevede forme di Realtà Aumentata in molte delle fasi produttive classiche. Nel design e PDC (Product Development Cycle) vengono utilizzate per la creazione di schizzi tridimensionali a sostituzione dei prototipi classici [9], creando anche forme di design collaborativo in cui il numero di utilizzatori della Realtà Aumentata è superiore ad uno. Sempre nella fase di PDC sono presenti sistemi di design evaluation che focalizzano l'attenzione sui feedback ottenibili dall'ambiente virtuale [10][11].

Nel campo del manufacturing, è attualmente possibile simulare lavorazioni ed errori di lavorazione, valutarne i risultati con parametri di processamento differenti, anche in tempo reale [12]; ma anche verificare la fattibilità dell'assemblaggio [13] o simularlo. Di particolare interesse sono tutte quelle applicazioni che sfruttano l'AR nel training [14] e nella guida all'assemblaggio manuale [15], contesto in cui è collocabile questa tesi.

Dato il recente sviluppo nel campo della robotica, sono stati studiati sistemi che permettono una programmazione della posizione dei giunti di un robot articolato e simulano il percorso degli stessi tramite tecnologia AR[16]. Anche il layout planning è stato "arricchito" da sistemi su base AR, infatti è possibile simulare ed ottimizzare disposizione di macchinari, materiali, ecc...[17]; recenti studi puntano anche alla risoluzione dei classici problemi di facility layout planning tramite 20 tecniche di AR[18]. Funzionalità simili a quelle presenti nei sistemi di supporto all'assemblaggio sono state usate per creare maintenance procedures di tipo correttivo e preventivo, soprattutto allo scopo di ridurre il tempo di reperimento delle informazioni utili ed implementare un supporto di tipo collaborativo [19]. Nell'ambito della manutenzione importante fu uno studio condotto da Steven J. Henderson e Steven Feiner [20], che prendendo in esame il mantenimento dei veicoli corazzati in ambito militare hanno deciso mettere a confronto varie tecnologie a supporto degli operatori della manutenzione: vengono prese in esame 3 tecnologie HUD, AR e LCD. I risultati che vengono fuori sono prevalentemente positivi: l'AR riesce ad accelerare determinati task come, ad esempio, la localizzazione di particolari componenti (risulta più veloce del 56% rispetto l'HUD e del 47% del LCD), ma come era prevedibile risulta meno facile da usare da parte degli operatori (circa mezzo punto di distacco dal LCD). Bisogna ricordare però, che l'AR, nonostante sia più difficile da usare (non essendo una tecnologia diffusa come altre) risulta intuitivo (4,5 punti in una scala da 1 a 5) e molto soddisfacente (quasi 5 in una scala da 1 a 5). Questi valori possono essere spiegati ad esempio dal vantaggio che l'utente ha nel non dover spostare in continuazione la testa avendo tutti le informazioni "sempre" dentro il raggio visivo. Nel caso dell'LCD invece l'utente vedrà le informazioni e il modello 3D nello schermo e dovrà andare a individuarlo nella realtà: in caso di modelli complessi dovrà ripetere l'operazione più volte.

Ricerche recenti dimostrano sempre più, come l'idea di utilizzare applicazioni di realtà aumentata e mista venga accolta da grandi e medie aziende in vari settori, dal manufacturing, alla manutenzione e controllo qualità, fino alla sicurezza o anche al marketing.

Nel 2014 sono stati eseguiti degli esperimenti su quali modelli di AR support system fossero maggiormente adeguati durante la fase di assemblaggio. In particolare, sono stati utilizzati dei blocchi di costruzioni LEGO, con due modalità differenti di visualizzazione attraverso HMD, con la prima che mostrava blocchi di guida direttamente sovrapposti al modello fisico, mentre la seconda vedeva un modello virtuale vicino a quello reale. [21] B. M. Khuong, K. Kiyokawa, A. Miller, J. J. La Viola, T. Mashita and H. Takemura, "The effectiveness of an AR-based context-aware assembly support system in object assembly," 2014 IEEE Virtual Reality (VR), 2014, pp. 57-62.

In [22] MA(2)RA - Manual Assembly Augmented Reality, viene descritto un sistema di assistenza alle operazioni da eseguire utilizzando dispositivi AR e in questo caso dei data-glove, con i quali un lavoratore inesperto viene guidato in ogni fase dell'assemblaggio.

In [23] Y. X. Zhang, J. Qi Cheng, J. Y. Wang and L. Zhao, "Co-assemble: A collaborative AR cross-devices teaching system for assemble practice courses," viene riportata una ricerca su come la realtà aumentata possa apportare un miglioramento per l'apprendimento di informazioni utili all'assemblaggio. In particolare, come nel caso studio, per il tracciamento delle informazioni viene utilizzato Azure Spatial Anchor, ritenuto molto utile per creare un sistema collaborativo multiutente dove l'insegnante può facilmente seguire lo studente passo passo garantendo una migliore comprensione delle attività. In ambito industriale, può risultare utile per l'insegnamento delle procedure che dovranno essere eseguite nelle postazioni di lavoro.

Altri studi, invece, riportano come la realtà aumentata e mista siano molto utili nel controllo qualità, come ad esempio in [24] "Mixed reality-based user interface for quality control inspection of car body surfaces.", ricerca basata sul riconoscimento delle superfici delle automobili tramite i Microsoft HoloLens di prima generazione e il conseguente rilevamento di difetti.

3 Metodo

L'obiettivo del lavoro di tesi è quello di creare un'applicazione di realtà mista utile durante la fase di assemblaggio e manutenzione di prodotti industriali. Per fare questo sono stati utilizzati due software all'avanguardia nel settore della Mixed Reality, come Unity, il plug-in MRTK e Azure Spatial Anchor, come specificato nel paragrafo introduttivo. Come hardware invece, dopo essere stati presi in considerazione diversi dispositivi, la scelta è ricaduta sui Microsoft HoloLens 2. Per caricare l'applicazione all'interno del visore è stato utilizzato invece Visual Studio.

3.1 Introduzione ad Unity e MRTK

La realizzazione del programma che poi dovrà essere caricato sul visore scelto, viene eseguita con il software UNITY, un motore per lo sviluppo di videogiochi (game development engine) che permette di creare videogame ed esportarli a più piattaforme, desktop, web, ed a diversi marketplace e device (windows store, iOS, Android, Playstation, Xbox). Unity fornisce un'ambiente di sviluppo visuale che ci consente di lavorare ai nostri giochi; attraverso una logica che può essere scritta in C#, Javascript e/oppure Boo. In altre parole, si tratta di un insieme di strumenti completo per la creazione di videogiochi e altri progetti interattivi, semplificando il processo di sviluppo e rendendolo più veloce.



Figura 3.1: Logo Unity

Il modo più semplice di sviluppare applicazioni di Realtà Mista in Unity è quello di usare il Mixed Reality Toolkit (MRTK).

MRTK-Unity è uno toolkit open source disponibile sin dalla prima versione di HoloLens, gestito da Microsoft che fornisce un set di componenti e funzionalità che consentono di accelerare lo sviluppo di app di realtà mista multiplatforma in Unity. Di seguito sono elencate alcune delle sue funzioni:

- Fornisce il sistema di input multiplatforma e i blocchi predefiniti per le interazioni spaziali e l'interfaccia utente.
- Abilita la creazione rapida di prototipi tramite simulazione nell'editor che consente di visualizzare immediatamente le modifiche.
- Opera come un framework estendibile che offre agli sviluppatori la possibilità di sostituire i componenti di base.
- Supporta un'ampia gamma di piattaforme

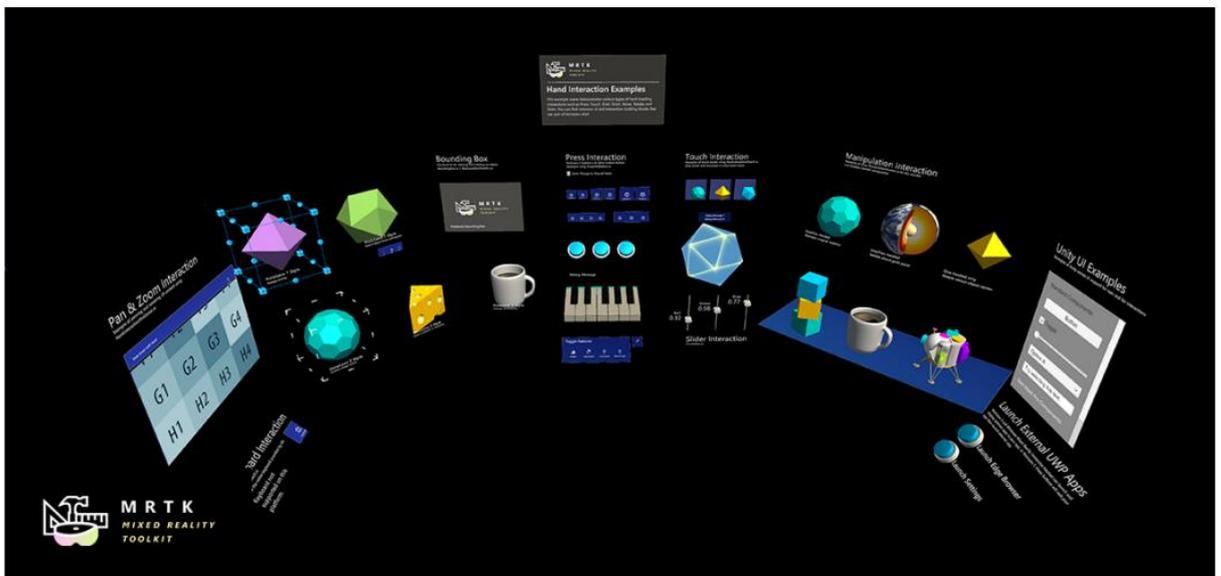


Figura 3.2: MRTK-Unity

Dopo aver scaricato tutti i pacchetti necessari del MRTK, con Unity si crea quella che dagli sviluppatori viene chiamata scena. La scena è ciò che poi vedrà l'operatore attraverso il dispositivo di realtà aumentata, per questo è molto importante che venga eseguita con accuratezza in ogni singolo dettaglio. Un aspetto fondamentale da considerare sono le dimensioni di ogni oggetto e le distanze tra gli oggetti stessi, in quanto Unity utilizza una scala metrica, che poi si rifletterà nello spazio di lavoro dell'utilizzatore.

L'interazione tra utente e oggetti appartenenti alla scena è dovuta a particolari programmi contenuti nel Mixed Reality Toolkit, chiamati in linguaggio informatico "Script", che gestiscono gli input gestuali e vocali, di spatial mapping, spatial understanding e di spatial sound.

3.2 Azure Spatial Anchor

Azure Spatial Anchor è un servizio di Microsoft che offre agli sviluppatori le funzionalità essenziali per creare applicazioni di realtà mista con riconoscimento dello spazio, utile per designare punti di interesse precisi e richiamarli dai dispositivi supportati. Questi punti di interesse precisi si definiscono ancoraggi nello spazio.



Figura 3.3: Azure Spatial Anchor

Anche per questo software, Microsoft ha creato un apposito pacchetto per sviluppatori, chiamato Azure Spatial Anchors SDK, da importare nella scena di Unity. Questi pacchetti consentono di avere all'interno della scena di Unity un 'ParentAnchor', il quale si presenta come un cubo, che è in grado di essere localizzato nel punto di interesse. Le coordinate di ogni 'ParentAnchor' verranno poi memorizzate nel portale di Azure, così da essere gestibili e richiamabili in qualsiasi momento se ne necessita.

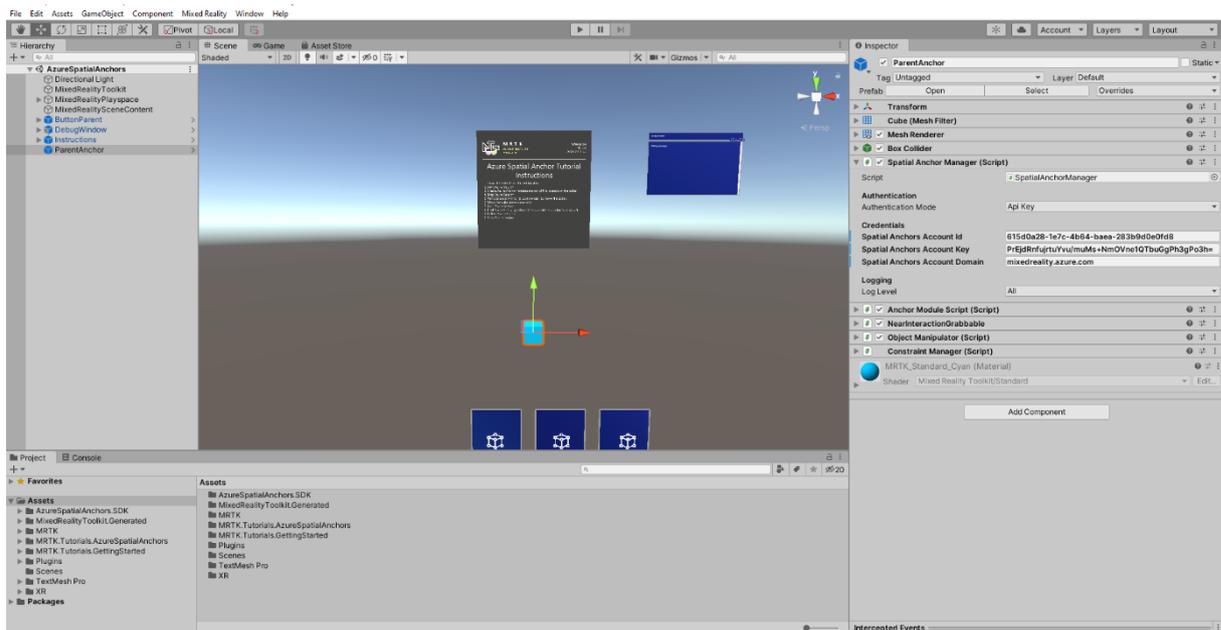


Figura 3.4: ParentAnchor in Unity

3.3 Visual Studio

Microsoft Visual Studio è un editor di codici tra più utilizzati per sviluppare applicazioni per smartphone, tablet e computer. La caratteristica principale di questo programma è la quantità di linguaggi informatici che riesce a supportare: C#, Visual Basic, F#, C ++, Python, Node.js e Html/Java, solo per citarne alcuni.

Visual studio, come vedremo successivamente, risulta molto utile, perché permette di cambiare alcune stringhe di codice per far si di ottenere il risultato ricercato e consente di caricare, una volta finita la costruzione della scena, l'applicazione all'interno dei Microsoft Hololens 2.

3.4 Microsoft HoloLens 2

Microsoft HoloLens2 è la seconda generazione di visori Microsoft, il primo computer olografico completamente indipendente che consente di interagire con contenuti digitali e ologrammi visualizzati nel mondo che circonda chi li indossa. Gli HoloLens2 sono stati sviluppati dalla Microsoft e funzionano in modo autonomo, ossia non necessitano di alcun collegamento con uno smartphone o altro dispositivo grazie alla loro connettività wi-fi.

Sono stati sviluppati inizialmente per l'ambito industriale, questo è anche uno dei motivi per cui sono uno dei device maggiormente utilizzati in questo contesto, ma la stessa Microsoft conta di renderli utilizzabili nella vita di tutti i giorni il più brevemente possibile.



Figura 3.5: Vista frontale Microsoft HoloLens 2



Figura 3.6: Vista laterale Microsoft HoloLens 2

Riguardo l'aspetto tecnico il visore è dotato di numerosi componenti di ultima generazione:

- Lenti olografiche see-through
- 4 telecamere di luce visibile per il tracciamento della testa (head tracking cameras);
- 2 telecamere a raggi a infrarossi (IR) per il tracciamento oculare;
- Sensore di profondità time-of-light (ToF) da 1 MP;
- Unità di misure inerziali (IMU) come accelerometri, giroscopi e magnetometri;
- Microfoni;
- Altoparlanti con spatial sound;
- Processore Qualcomm Snapdragon 850;
- DRAM da 4 GB;
- Memoria di archiviazione da 64 GB;
- Wi-fi
- Bluetooth
- USB type-C DRP

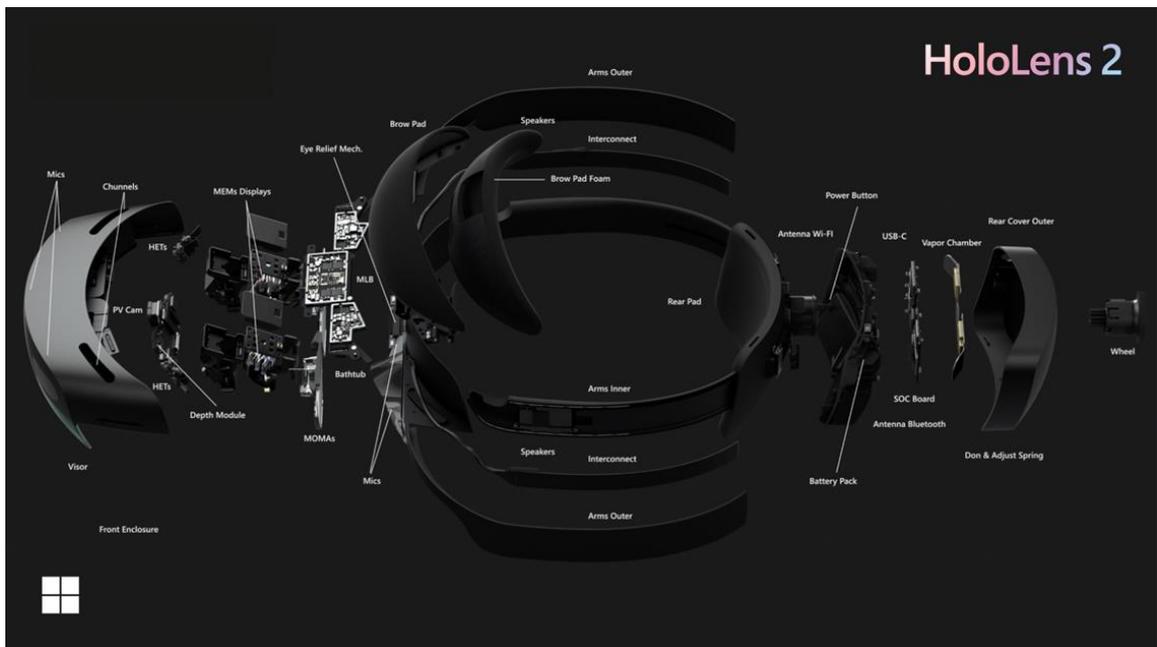


Figura 3.7: Hardware HoloLens 2

Le funzionalità principali si fondano sul riconoscimento del fattore umano e sulla comprensione dell'ambiente. Dispone infatti di:

- Sistema di tracciamento delle mani;
- Sistema di tracciamento oculare istantaneo;
- Controllo vocale attraverso l'interazione con l'intelligenza artificiale (AI) di Microsoft, Cortana;
- Rilevamento posizionale su scala globale, rilevamento dei sei gradi di libertà (6DoF);
- Mapping spaziale attraverso mesh dell'ambiente in tempo reale;
- Acquisizione in realtà mista, foto e video di ambienti fisici e ologrammi contemporaneamente;

Per quanto riguarda l'aspetto ergonomico, Microsoft HoloLens 2 sono facili da indossare, anche per chi già ha occhiali da vista, grazie ad una fascia che avvolge la testa e fa da supporto alla struttura delle lenti. Quest'ultime inoltre possono ruotare verso l'alto, pertanto non è necessario togliere totalmente il visore qualora sia necessario liberare la visuale dagli ologrammi per un arco di tempo breve. Il tutto ha un peso di circa 566 grammi, batteria compresa, che di fatto lo rende uno dei dispositivi più leggeri in circolazione.

Un'altra particolarità è legata alla presenza di una videocamera frontale da 8 MP per le videochiamate di assistenza, poiché permette ad un operatore esterno di visualizzare ciò che l'utente ha avanti a sé e di aiutarlo nell'esecuzione di lavori o nella manutenzione e riparazione di componenti.

Gli aspetti che non convincono del tutto sono legati alla durata della batteria, che per il momento è limitata ad un massimo di 3 ore, all'invasività che possono avere gli occhiali in alcune situazioni lavorative e come la visualizzazione di ologrammi possa stancare la vista dell'utente andando a recargli ulteriore stress, oltre quello lavorativo.

4 Caso studio

Come già introdotto nei primi capitoli della tesi, il lavoro svolto è basato su la creazione di un'applicazione di realtà mista con il software Unity. Questa scelta è stata presa dopo aver considerato numerose soluzioni di tracking industriale, da quelle ottiche a quelle inerziali o imaged-based. In particolare, quelle ottiche sono state scartate per questioni legate all'ambiente di lavoro, che non rendevano possibile l'utilizzo di questa tipologia di tracker, in modo quasi analogo è stata scartata l'idea di utilizzare sensori inerziali per il tracciamento. Per quanto riguarda l'approccio imaged-based le problematiche erano legate all'impossibilità di applicare dei markers sulle trasmissioni dei trattori, in quanto sarebbero rimasti applicati anche nel post-produzione e sarebbero andati a rovinare l'estetica del prodotto finito.

Sono state varate anche opzioni di tracciamento tramite un algoritmo di machine learning o tramite scansioni da parte del visore dell'oggetto visualizzato, con il software Model Target Vuforia. La prima idea è stata scartata per via dell'enorme database da creare con immagini e CAD render e una possibilità di riconoscimento non immediata e con margine di errore, mentre la seconda è stata scartata dopo aver visionato i limiti che potevano presentarsi con l'utilizzo del software citato sopra in questa determinata situazione di lavoro. Infatti, Vuforia ha la necessità di avere oggetti rigidi, superfici non lucide e rischia di avere dei malfunzionamenti nel tracciare oggetti in movimento. Proprio la presenza di cavi non rigidi, trasmissioni verniciate con un nero lucido e in movimento sulla linea di montaggio incontrava tutti i limiti del software citato e per questo è stato deciso di non utilizzarlo.

Dopo queste considerazioni, la scelta è ricaduta nei pacchetti introdotti nel capitolo 3, che risultano essere la soluzione migliore per le richieste di CNH Industrial, azienda per cui è stato eseguito questo progetto, in quanto permette di ottenere un ambiente di lavoro sgombro da eventuali impedimenti, ma di avere a disposizione comunque tutte le informazioni necessarie al cablaggio del corpo trattore.

Per iniziare la costruzione dell'applicazione bisogna creare una nuova scena in Unity e importare i pacchetti del MRTK necessari a creare questo genere di applicazioni. In particolare, sono stati installati i seguenti plug-in:

- Mixed Reality ToolKit Foundation 2.7.2
- Mixed Reality OpenXR Plugin 1.0.0

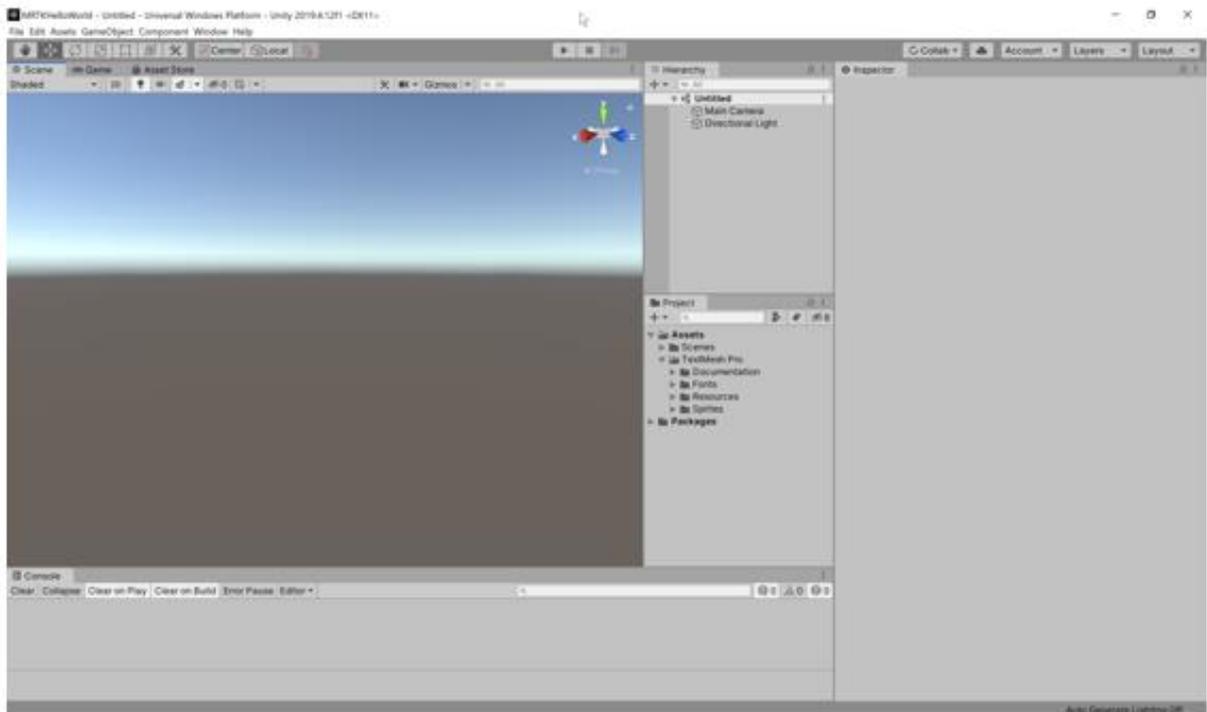


Figura 4.1: Nuovo progetto Unity

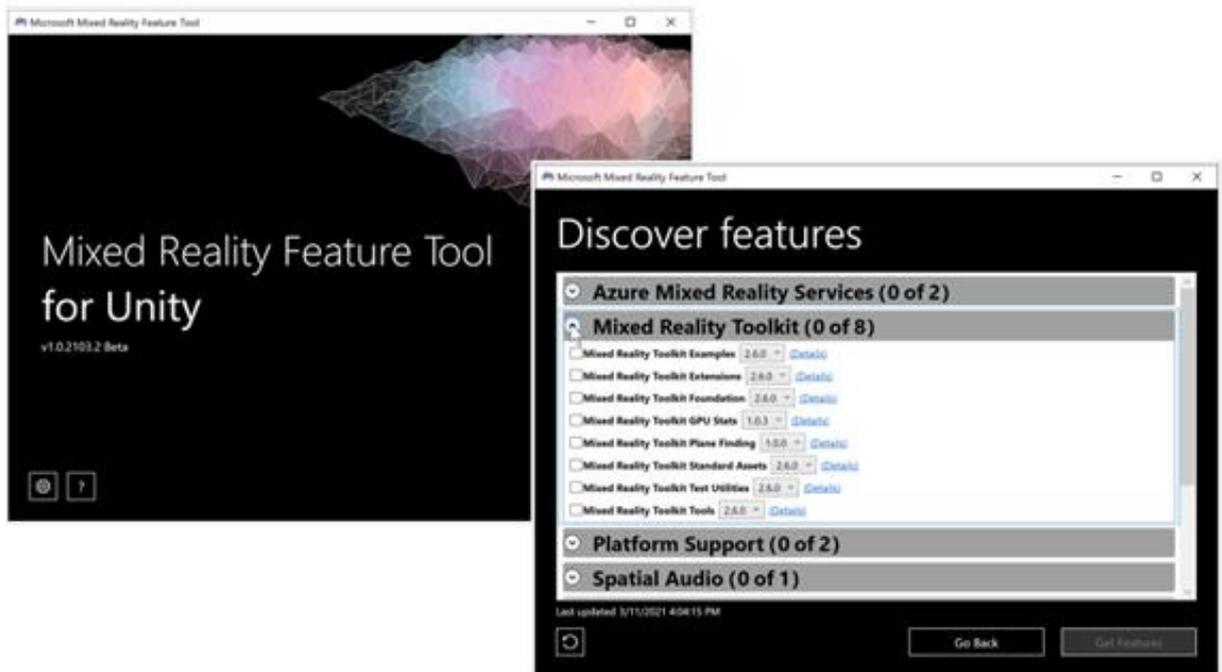


Figura 4.2: Configurazione MRTK

Una volta aggiunto MRTK alla scena è necessario clonarlo. Questa azione si rende necessaria dal momento che in Unity non è possibile andare a cambiare determinate impostazioni di plug-in o oggetti primari.

A questo punto dopo aver delineato la nuova configurazione profilo della scena, è necessario abilitare lo 'Spatial Awareness System', ovvero il sistema di consapevolezza spaziale, che permette all'applicazioni di rispondere e interagire con l'ambiente. Anche qui bisognerà procedere con una clonazione per rendere il sistema spaziale impostabile a seconda delle necessità.

Dopo aver impostato la scena per la creazione di contenuti di realtà mista, diventa necessario far lavorare la scena con il programma di tracking Azure Spatial Anchor. Per questo Microsoft ha elaborato degli appositi pacchetti da scaricare e caricare successivamente in Unity, in particolare i necessari ad elaborare il progetto sono:

- MRTK.HoloLens2.Unity.Tutorials.Assets.GettingStarted.2.4.0.unitypackage
- MRTK.HoloLens2.Unity.Tutorials.Assets.AzureSpatialAnchors.XRpluginManagement.2.5.3.unitypackage

Con i seguenti pacchetti del Mixed Reality Toolkit e di Azure Spatial Anchor si dispone di tutta una serie di assets, prefabs, menù e scripts creati dagli sviluppatori, utili per sviluppare scene di mixed reality. Al loro interno infatti possiamo trovare una serie di menù con diverse possibilità di scelta di pulsanti, oggetti di scena, animazioni e mesh. All'interno della dei pacchetti relativi all'Azure Spatial Anchor si trovano i seguenti prefabbricati utilizzati:

- ButtonParent
- DebugWindow
- Instructions
- ParentAnchor

Il 'ButtonParent' è un prefabbricato degli sviluppatori Microsoft che una volta posto in scena permette di avere un menù appositamente creato per richiamare alcune funzionalità, come creare, salvare, trovare e cancellare gli ancoraggi creati nel tempo. Per modificare la tastiera che si avrà davanti, bisognerà clonare il ButtonParent, così da ottenerne uno modificabile, poi ad ogni singolo bottone si può andare ad assegnare una specifica funzione, assegnandogli un apposito script, in base alle necessità.



Figura 4.3: ButtonParent

La 'DebugWindow' e la 'Instruction' sono due schede olografiche base con due funzionalità diverse. Nella prima verranno elencate le singole operazioni eseguite e la loro riuscita, come, la creazione di nuovi ancoraggi e il loro salvataggio, mentre nella seconda, come si evince dal nome inglese, sono presenti le istruzioni per creare ancoraggi, posizionarli nello spazio di lavoro e ricaricarli.

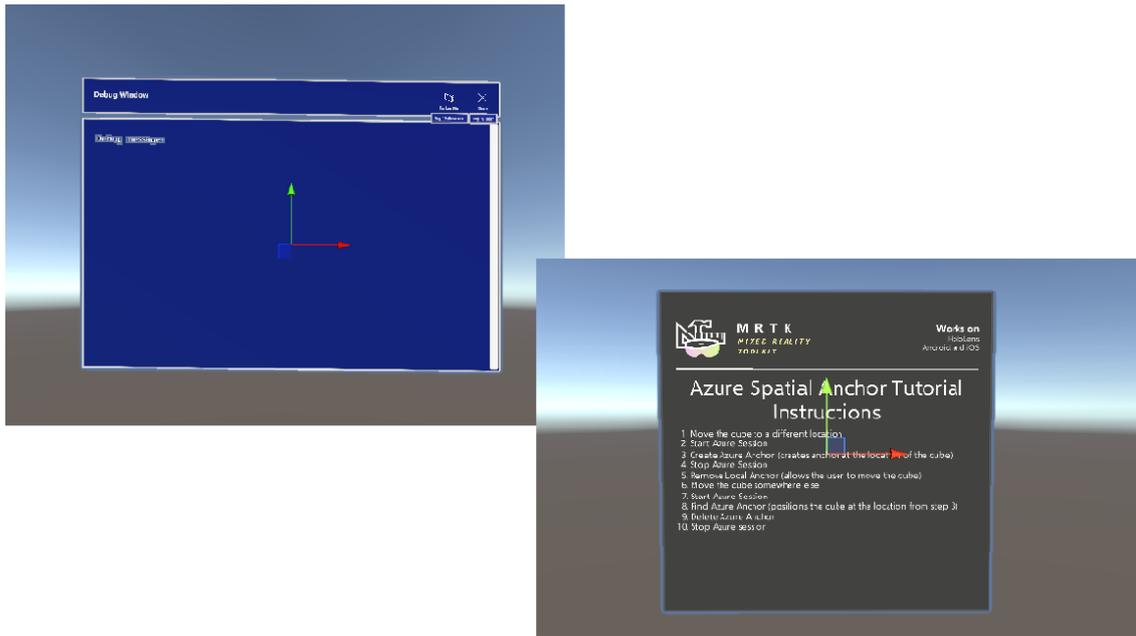


Figura 4.4: DebugWindow e Instruction

Il 'ParentAnchor' è il componente centrale di ASA. Come già detto si presenta sotto forma di cubo ed è colui che viene rintracciato nell'ambiente circostante. La parola parent (genitore in italiano) ricorre molto spesso nel linguaggio di Unity, e con essa si vanno a identificare gli oggetti di una scena a cui sono stati associati altri elementi. Questi elementi banalmente vengono definiti figli, poiché quest'ultimi seguiranno tutto quello che farà l'oggetto padre. Quindi, ad esempio, se viene spostato l'oggetto padre, gli stessi spostamenti saranno eseguiti dagli oggetti figlio.

Il cubo consente di rintracciare ogni volta gli ologrammi posizionati nell'ambiente di lavoro, attraverso delle apposite credenziali che vengono generate nel portale di Azure. Ogni progetto avrà un ParentAnchor con credenziali differenti, questo permette, ogni qual volta serva una determinata scena, di richiamare i giusti ancoraggi e le giuste indicazioni, salvate nel portale di Azure.

A questo punto, una volta eseguiti tutti passaggi per iniziare a creare l'applicazione, bisogna procedere con la messa in scena delle informazioni che dovranno visualizzare gli operatori che indosseranno il visore. In questo particolare caso è stato conveniente utilizzare solo due ParentAnchor e ad ognuno di essi assegnare come figli tre diverse istruzioni da visualizzare. Avendo disposto per ogni singolo ancoraggio più informazioni, che non saranno poi manipolabili, perché direttamente connesse all'ancora, è utile ricordare che Unity è basato su una scala metrica, pertanto è necessario posizionare, già in fase di realizzazione, le istruzioni con le distanze che poi dovranno avere nell'ambiente reale. Questo solitamente potrebbe essere un limite, ma in questa situazione non va ad influire nell'adeguata riuscita del progetto, ma anzi ne semplifica alcuni passaggi successivi.

Un importante modifica è stata fatta anche al ButtonParent, per renderlo più intuitibile e semplice da utilizzare in ambito lavorativo.

Come si vede dalla *Figura 4.3: ButtonParent* e dalla *Figura 4.4: DebugWindow e Instruction* ogni bottone presente nel prefabbricato ButtonParent era necessario ad eseguire una determinata operazione, secondo lo schema riportato nella tabella Instruction.

In particolar modo, per creare un nuovo ancoraggio e ricaricarlo nella posizione in cui è stato sistemato, è necessario eseguire sempre le medesime operazioni:

- Per creare e salvare un ancoraggio:

1. Start Azure session
2. Create Azure anchor
3. Save Azure anchor

- Per ricaricare un ancoraggio:

4. Start Azure session
5. Find Azure anchor

A fronte di questo è sembrato utile creare un unico tasto per dare origine a nuove ancore ed un altro per riaverle nelle posizioni desiderate che eseguissero automaticamente le procedure.

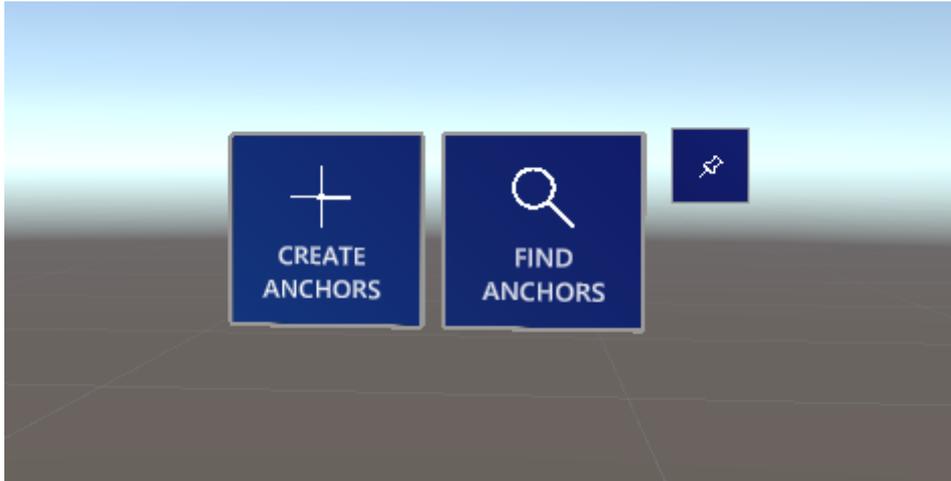


Figura 4.5: Tasti Create e Find Anchors

Questa, però non è un'opzione disponibile in Unity tramite i prefabs, pertanto, è stato necessario trovare una soluzione diversa dalle solite. In particolare sono stati presi due tasti generici, quindi tramite il software Visual Studio è stato possibile creare delle stringhe di codice che permettano a questi pulsanti di eseguire le operazioni che avrebbero eseguito tutti gli altri, ma con un solo click.

La Figura 4.6 mostra quali stringhe di codice sono state riscritte per ottenere questo risultato.

```

public async void RetrieveAndPlaceAnchors(int row)
{
    if (cloudManager.Session != null)
        await StopUnloadAzureSession();
    else
        GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk(row);
    await StartLoadAzureSession();
    FindAzureAnchor();
}

public async void NewAnchors(GameObject theObject)
{
    await StartLoadAzureSession();
    await CreateMultipleAzureAnchor(theObject);
    SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk();
}

```

Figura 4.6: Codici button cambiati

Queste riportate sono le stringhe dei due tasti principali, in particolare la stringa 'NewAnchors' fa riferimento al tasto 'Create Anchors', e sono state cambiate le seguenti righe:

- Da StarAzureSession a StartLoadAzureSession
- Da CreateAzureAnchor a CreateMultipleAzureAnchor
- Da SaveAzureAnchorIdToDisk a SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk

Inoltre la funzione SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk è stata modificata ulteriormente come riportato nella *Figura 4.7: SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk*

```

public void SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk()
{
    Debug.Log("\nAnchorModuleScript.SaveMultipleAzureAnchorIDToDisk()");

    string filename = "SavedAzureAnchorID.txt";
    string path = Application.persistentDataPath;

#if WINDOWS_UWP
    StorageFolder storageFolder = ApplicationData.Current.LocalFolder;
    path = storageFolder.Path.Replace('\\', '/') + "/";
#endif

    string filePath = Path.Combine(path, filename);
    File.AppendAllText(filePath, currentAzureAnchorID);
    File.AppendAllText(filePath, "\n");

    Debug.Log($"Current Azure anchor ID '{currentAzureAnchorID}' successfully saved to path '{filePath}'");
}

```

Figura 4.7: SaveMultipleAzureAnchorIdToDisk

Per quanto riguarda la riga 'RetriveAndPlaceAnchors' le modifiche apportate sono le seguenti:

- Da StopAzureSession a StopUnloadAzureSession
- Da GetAzureAnchorIdFromDisk a GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk

Anche per il GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk sono state apportate ulteriori modifiche ai codici come riportato nella Figura 4.8: GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk

```

public void GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk(int row)
{
    Debug.Log("\nAnchorModuleScript.LoadMultipleAzureAnchorIDFromDisk()");

    string filename = "SavedAzureAnchorID.txt";
    string path = Application.persistentDataPath;

#if WINDOWS_UWP
    StorageFolder storageFolder = ApplicationData.Current.LocalFolder;
    path = storageFolder.Path.Replace('\\', '/') + "/";
#endif

    string filePath = Path.Combine(path, filename);
    string[] lines = File.ReadAllLines(filePath);
    currentAzureAnchorID = lines[row - 1];

    Debug.Log($"Current Azure anchor ID successfully updated with saved Azure anchor ID '{currentAzureAnchorID}' from path '{path}'");
}

```

Figura 4.8: GetMultipleAzureAnchorIdFromDisk

Inoltre, in ogni stringa è stata aggiunta la funzione 'await', la quale fa in modo che una volta premuto un tasto venga inizializzata e conclusa la prima operazione per passare poi alla successiva.

Dopo aver apportato queste modifiche, si è passati allo sviluppo delle istruzioni da far visualizzare all'operatore. Anche qui sono stati utilizzati gli oggetti forniti dal Mixed Reality Toolkit, in particolare una semplice finestra blu, nella quale sono state riportate le informazioni che l'operatore potrà leggere istantaneamente. Inoltre, ad ogni istruzione è stata associata un'immagine che faccia in modo che l'operatore riesca anche a prendere visione di come dovrà essere, una volta terminato, il cablaggio in quel determinato punto della trasmissione. In aggiunta, questa immagine, non solo è presente come supporto per l'operatore, ma è anche stata resa interattiva, così che una volta finita la determinata operazione, l'utente con un semplice click sulla figura possa scorrere immediatamente all'istruzione successiva. Per fare questo, nella schermata 'Inspector' di Unity, all'interno del component 'Pressable Button' di ogni istruzione, sono stati aggiunti i seguenti eventi riportati in *Figura 4.9: Eventi modificati*



Figura 4.9: Eventi modificati

Ogni istruzione è stata collocata in un punto ben preciso della scena, poiché sarà la posizione che dovrà poi avere nell'ambiente di lavoro ed inoltre devono essere facilmente leggibili da chi indosserà gli occhiali e quindi eseguite con molta attenzione nei minimi particolari, come si può vedere nella *Figura 4.10: Istruzione per operatore* e nella *Figura 4.11: Distribuzione istruzioni nella scena Unity*

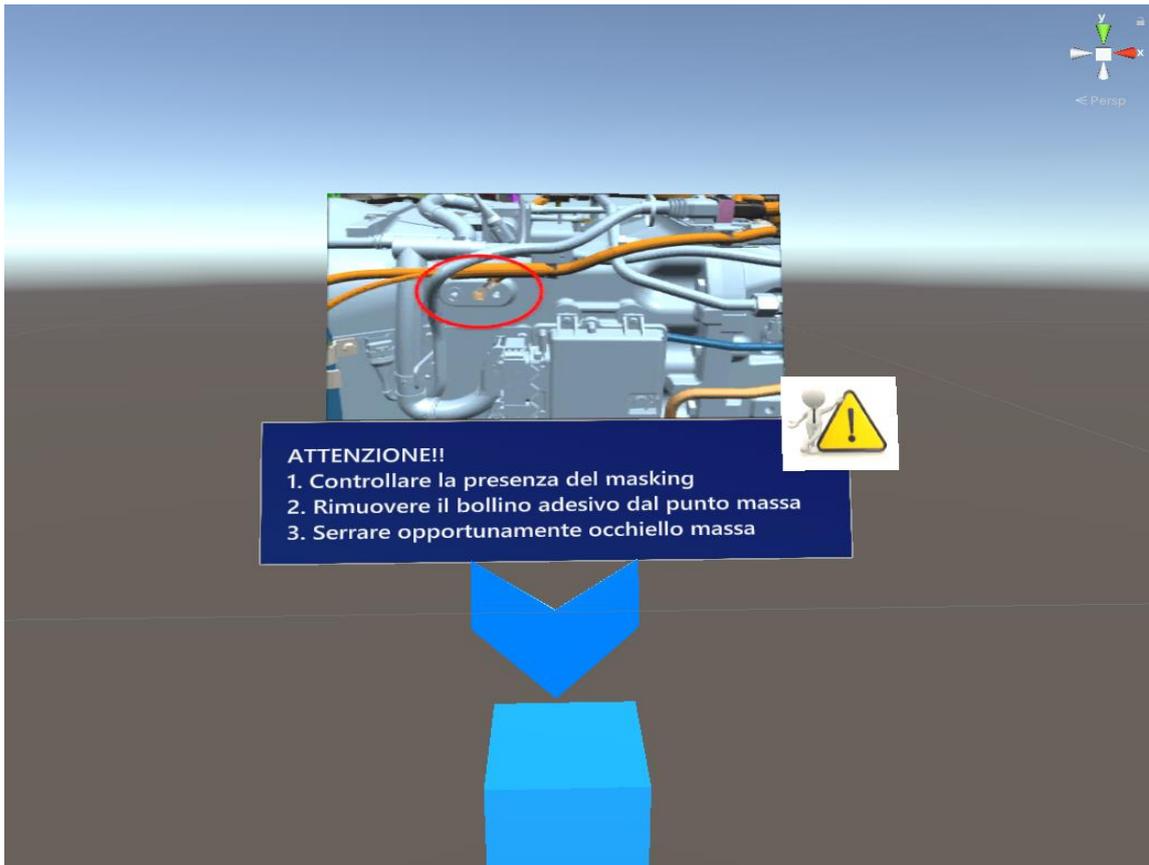


Figura 4.10: Istruzione per operatore

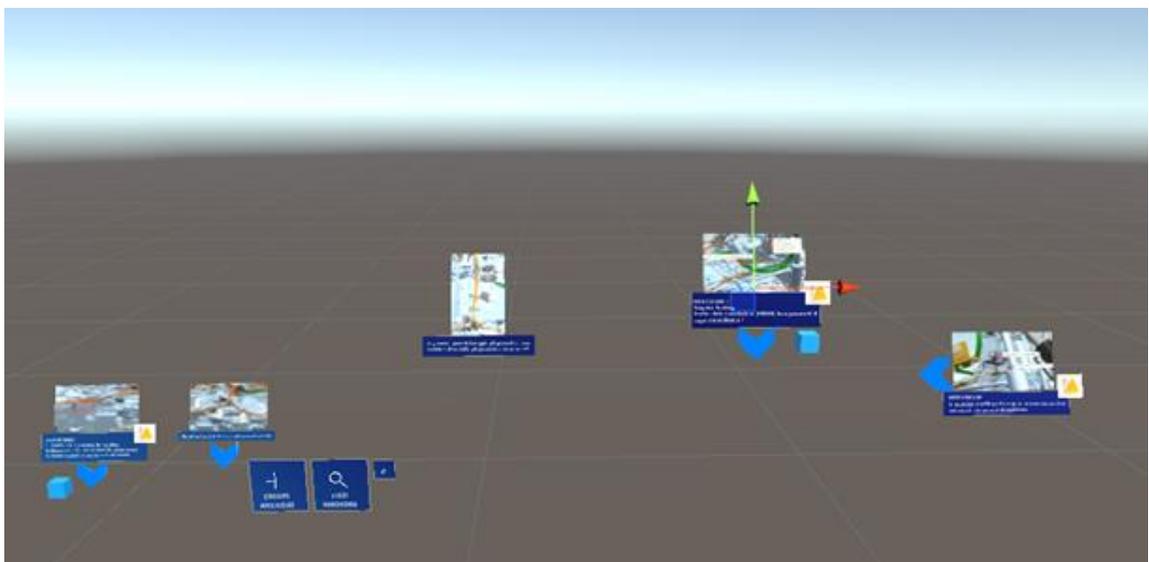


Figura 4.11: Distribuzione istruzioni nella scena Unity

Inoltre, è stato fatto in modo che non vengano visualizzate tutte insieme le informazioni, per lasciare il più possibile libero il campo visivo dell'operatore, ma che ogni qual volta una delle operazioni sia finita, con il click sull'immagine si vada alla successiva.

Una volta finito lo sviluppo della scena in Unity, bisogna andare a caricare l'applicazione all'interno dei Microsoft Hololens 2, tramite Visual Studio, applicando le impostazioni evidenziate nella *Figura 4.13: Impostazioni per distribuzione applicazione*

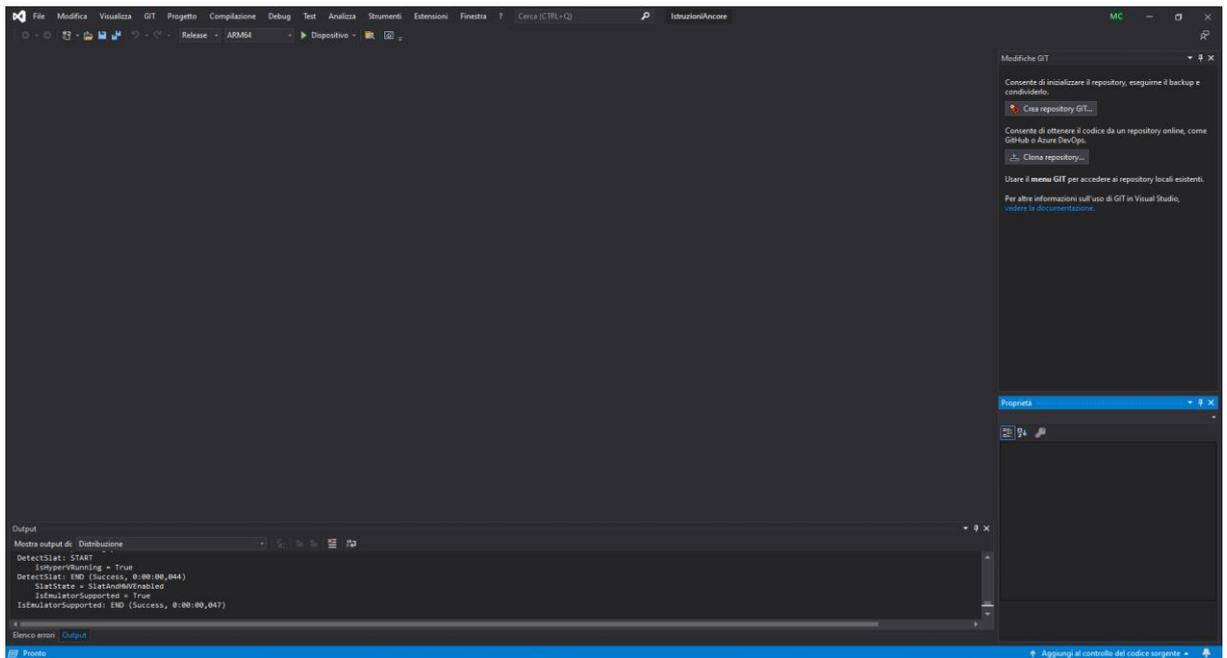


Figura 4.12: Visual Studio

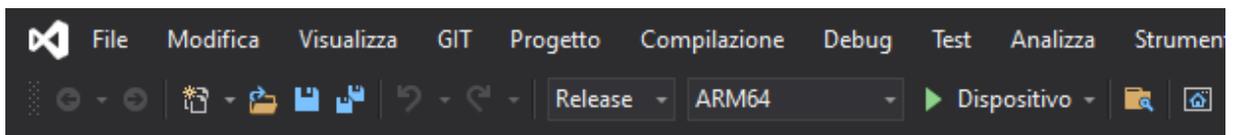


Figura 4.13: Impostazioni per distribuzione applicazione

Dopo aver eseguito la distribuzione all'interno del visore, all'avvio di quest'ultimo l'applicazione comparirà nel tipico menù Windows presente nei Microsoft Hololens 2. Ora basta semplicemente avviare l'applicazione, e l'utente si troverà di fronte la scena creata con Unity, come è possibile vedere in *Figura 4.14: Visualizzazione della scena tramite Microsoft Hololens 2*.



Figura 4.14: Visualizzazione della scena tramite Microsoft HoloLens 2

Nella Figura 4.14: Visualizzazione della scena tramite Microsoft HoloLens 2 è possibile vedere come verrà visualizzata la scena da parte dell'utente prima di andare ad immetterla nell'ambiente di lavoro. In rosso sono stati evidenziati i ParentAnchor che sono stati resi trasparenti per non intralciare la vista dell'operatore durante l'esecuzione dei cablaggi.

Ora è necessario posizionare i ParentAnchor nella giusta posizione della trasmissione da cablare, così che l'operatore riesca a visualizzare le informazioni adeguatamente. Come già detto in precedenza, questa operazione deve essere eseguita con accuratezza per ottenere un buon risultato.

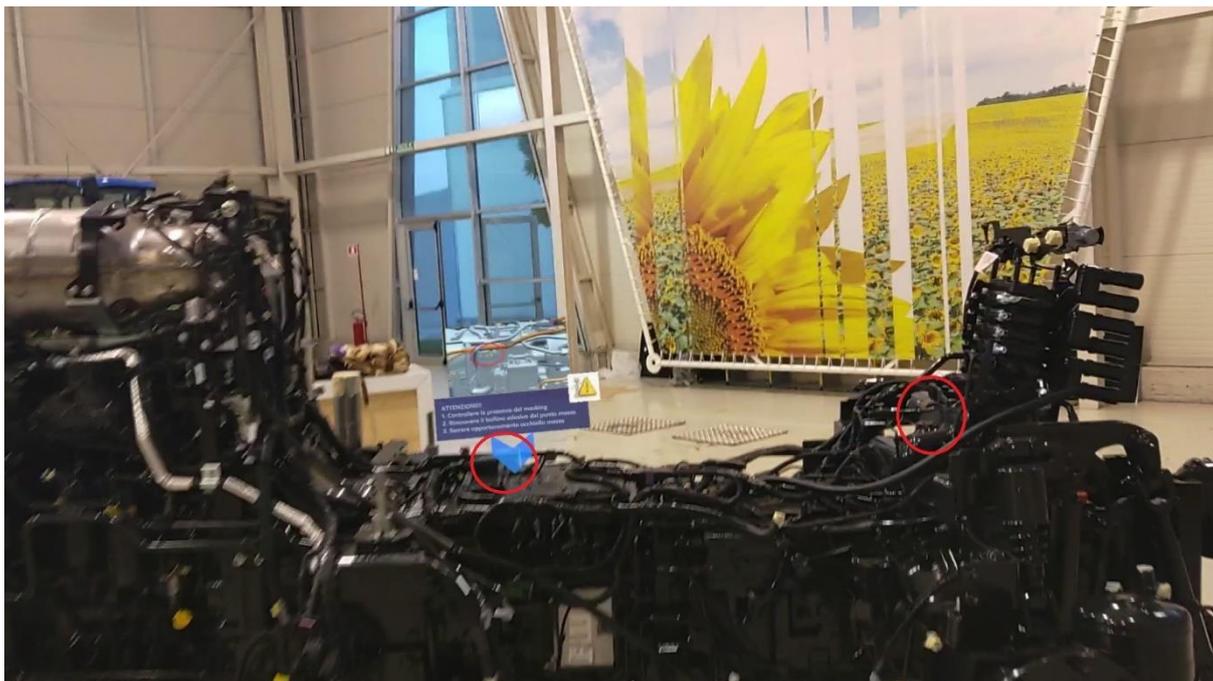


Figura 4.15: Ancoraggi posizionati sopra la trasmissione da cablare

Dopo aver posizionato adeguatamente i ParentAnchor, si procede andando a salvarli nella determinata posizione, semplicemente facendo un click sul button 'Create Anchors'. Dopo questa procedura gli ancoraggi sono stati creati e salvati e possono essere sempre richiamabili in qualsiasi momento ne fosse necessario.

Appunto, per riottenere le informazioni nelle loro posizioni, occorrerà semplicemente fare un click sul button 'Find Anchors', e riaverle immediatamente a disposizione.

5 Risultati e discussione

Per capire come l'applicazione possa essere utile in ambito lavorativo sono stati fatti una serie di questionari utili a capirne effettivamente cosa ne pensassero gli operatori che la devono andare ad utilizzare durante l'orario lavorativo. I risultati ottenuti sono poi stati riportati nelle tabelle seguenti. In particolare, sono stati posti a confronto l'attuale modello di consultazione delle informazioni, ovvero quello paper based e la nuova applicazione di realtà mista.

5.1 Confronto modelli

Nella prima tabella riportata sottostante sono stati messi a confronto gli errori fatti durante la fase di cablaggio, il numero di volte che le istruzioni sono state consultate, le richieste di supporto e le tempistiche di consultazione delle istruzioni e totali di processo. I risultati ottenuti sono i seguenti:

Tabella 1: Confronto modello paper based e applicazione

	Us er 1	Us er 2	Us er 3	Us er 4	Us er 5	Us er 6	Us er 7
ORDINE ESECUZIONE	A-P-C	C-A-P	P-A-C	A-P-C	P-C-A	C-A-P	C-A-P
PAPER_Errori	5	3	3	3	6	4	5
PAPER_Consultazioni istruzioni	10	9	16	6	18	6	5
PAPER_Richiesta supporto	4	1	2	0	7	0	0
PAPER_Tempo istruzioni	02:38	01:07	05:43	01:09	10:12	01:26	03:07
PAPER_Tempo esecuzione task	04:30	03:07	04:47	03:27	07:18	03:17	03:53
PAPER_Tempo totale	07:08	04:14	10:30	04:36	17:30	04:43	07:00
ANCORE_Errori	4	3	3	2	4	2	5
ANCORE_Consultazioni istruzioni	7	11	7	12	5	7	19
ANCORE_Richiesta supporto	2	1	0	0	0	0	5
ANCORE_Tempo istruzioni	03:35	04:15	01:30	01:44	01:39	01:47	07:26

ANCORE_Tempo esecuzione task	02:57	05:31	03:00	02:56	02:11	02:37	07:20
ANCORE_Tempo totale	06:32	09:46	04:30	04:40	03:50	04:24	14:46

Come si può notare con l'utilizzo del supporto di realtà mista gli errori sono diminuiti in quasi tutti gli utenti, che certifica già un'adeguata completezza ed efficienza dell'applicazione, considerando anche che tutti i candidati si trovavano di fronte alla prima esperienza di realtà mista. Inoltre, un altro dato molto importante è la riduzione delle richieste di supporto in quasi tutti gli utenti, in alcuni casi sono stati addirittura annullate e per quanto riguarda le tempistiche, è visibile come ci sia un aumento di tempo nella consultazione delle informazioni, probabilmente legato anche all'inesperienza dell'operatore alla situazione, ma una notevole migioria nell'esecuzione totale delle operazioni nella maggior parte dei candidati presi in considerazione. Già questo, legato alla diminuzione di errori citata prima, da una importante certificazione alla soluzione proposta.

5.2 User Experience Questionnaire

Un aspetto fondamentale per capire l'usabilità dell'applicazione è il feedback di chi poi dovrà utilizzarla durante le giornate lavorative. Per ottenere una valutazione si è deciso di utilizzare l'"User Experience Questionnaire", questionario utile a quantificare il grado di soddisfazione dell'utente.

Come si può vedere nella *Tabella 2: User experience questionnaire* **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, alla sinistra e alla destra della tabella si trovano degli aggettivi che descrivono il funzionamento e l'usabilità dell'applicazione, mentre nel centro si trovano dei numeri da 1 a 7, dove 1 è una valutazione molto negativa e 7 è una valutazione molto positiva, che ci permettono di comprendere il pensiero dell'utilizzatore e se possa essere utilizzata questa soluzione.

Tabella 2: User experience questionnaire

	1	2	3	4	5	6	7	
Incomprensibile	○	○	○	○	○	○	○	Comprensibile
Difficile da apprendere	○	○	○	○	○	○	○	Facile da apprendere
Ostruttivo	○	○	○	○	○	○	○	Di supporto
Complicato	○	○	○	○	○	○	○	Facile
Non soddisfa le aspettative	○	○	○	○	○	○	○	Soddisfa le aspettative
Inefficiente	○	○	○	○	○	○	○	Efficiente
Confuso	○	○	○	○	○	○	○	Chiaro
Non pragmatico	○	○	○	○	○	○	○	Pragmatico
Sovraccarico	○	○	○	○	○	○	○	Ordinato
Convenzionale	○	○	○	○	○	○	○	Innovativo
Scoraggiante	○	○	○	○	○	○	○	Stimolante
Inutile	○	○	○	○	○	○	○	Utile

I seguenti risultati dell' user experience sono basati sull'attuale modello di consultazione delle informazioni utilizzato dall'azienda CNH Industrial, ovvero quello paper based e dell'applicazione di realtà mista con ancoraggi sviluppata.

Tabella 3: Risultati UEQ Paper Based

PAPER_BASED							
User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8
7	5	5	7	2	2	5	5
6	5	4	5	5	2	5	5
6	6	7	5	4	3	5	4
6	5	2	5	5	3	5	4
6	5	6	6	5	6	4	4
6	5	5	6	3	3	4	4
6	5	4	6	5	4	4	4
5	6	4	5	4	2	5	4
6	6	7	4	5	2	5	5
2	3	1	2	2	1	4	1
4	4	7	6	3	2	4	3
3	4	7	6	5	2	5	4

Tabella 4; Risultati UEQ per Applicazione di MR

MR_ANCORE							
User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7	User 8
6	6	7	7	7	7	7	5
7	6	7	6	6	7	7	4
4	7	7	7	7	7	7	4
6	6	7	6	6	7	6	3
4	6	7	7	7	7	6	4
5	7	7	7	7	7	7	4
5	6	7	7	6	6	6	4
5	7	7	7	5	7	6	4
6	7	7	7	6	6	5	5
7	7	7	7	7	7	7	6
7	7	7	7	7	7	7	6
6	7	7	7	7	7	7	5

Successivamente questi dati sono stati analizzati e ciò che è venuto fuori è stato riportato successivamente, con le percentuali di voti assegnati ad ogni risposta richiesta nei questionari, ricordando che i punteggi vanno dall'1, valutazione molto bassa, al 7, valutazione molto positiva.

Tabella 5: Risultati analisi dell'UEQ per il modello paper based

PAPER_BASED							
	1	2	3	4	5	6	7
Incomprensibile/ comprensibile	0%	25%	0%	0%	50%	0%	25%
Difficile/Facile da apprendere	0%	12.5%	0%	12.5%	62.5%	12.5%	12.5%
Ostruttivo/di supporto	0%	0%	12.5%	25%	25%	25%	12.5%
Complicato/facile	0%	12.5%	12.5%	12.5%	50%	12.5%	0%
Non/soddisfa le aspettative	0%	0%	0%	25%	25%	50%	0%
Inefficiente/	0%	0%	25%	25%	25%	25%	0%

efficiente							
Confuso/chiaro	0%	0%	0%	50%	25%	25%	0%
Non pragmatico/ pragmatico	0%	12.5%	0%	37.5%	37.5%	12.5%	0%
Sovraccarico/ ordinato	0%	12.5%	0%	12.5%	37.5%	25%	12.5%
Convenzionale/ innovativo	37.5%	37.5%	12.5%	12.5%	0%	0%	0%
Scoraggiante/ stimolante	0%	12.5%	25%	37.5%	0%	12.5%	12.5%
Inutile/utile	0%	12.5%	12.5%	25%	25%	12.5%	12.5%

Tabella 6: Risultati analisi UEQ per Applicazione MR

MR_ANCORE							
	1	2	3	4	5	6	7
Incomprensibile/ comprensibile	0%	0%	0%	0%	12.5%	25%	62.5%
Difficile/Facile da apprendere	0%	0%	0%	12.5%	0%	37.5%	50%
Ostruttivo/di supporto	0%	0%	0%	0%	25%	0%	75%
Complicato/facile	0%	0%	12.5%	0%	0%	62.5%	25%
Non/soddisfa le aspettative	0%	0%	0%	25%	0%	25%	50%
Inefficiente/ efficiente	0%	0%	0%	12.5%	12.5%	0%	75%
Confuso/chiaro	0%	0%	0%	12.5%	12.5%	50%	25%
Non pragmatico/ pragmatico	0%	0%	0%	12.5%	25%	12.5%	50%

Sovraccarico/ ordinato	0%	0%	0%	0%	25%	37.5%	37%
Convenzionale/ innovativo	0%	0%	0%	0%	0%	12.5%	87.5%
Scoraggiante/ stimolante	0%	0%	0%	0%	0%	12.5%	87.5%
Inutile/utile	0%	0%	0%	0%	12.5%	12.5%	75%

Tabella 7: Analisi metodo paper based

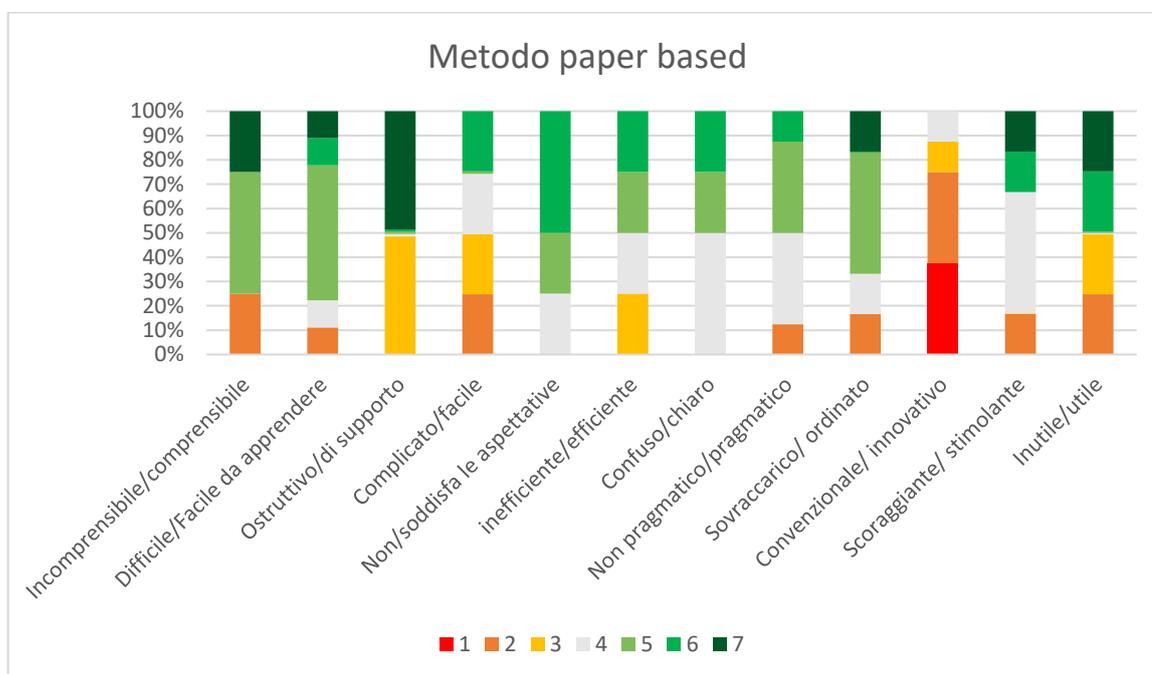
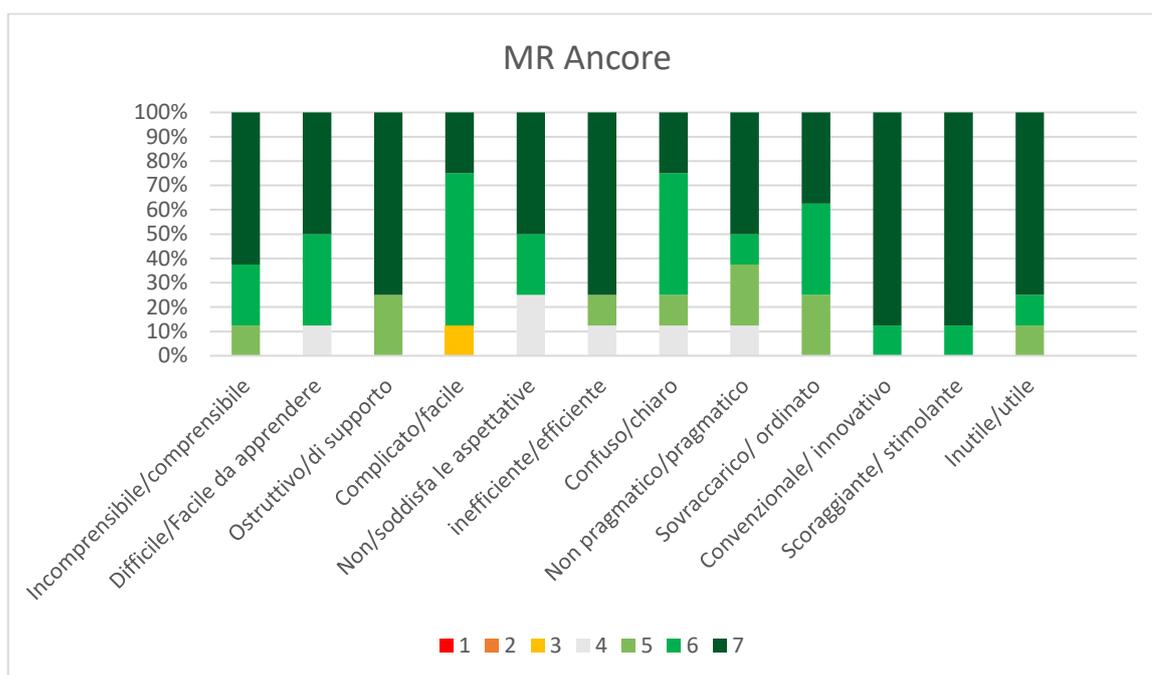


Tabella 8: Analisi metodo MR



Come si nota nella *Tabella 7: Analisi metodo paper based* nella *Tabella 8: Analisi metodo MR* appare chiaro che la nuova applicazione sviluppata risulti funzionale in quasi tutti gli aspetti presi in considerazione, rispetto al più vecchio metodo paper based, secondo la maggior parte degli operatori che hanno compilato il questionario. Anche questa approvazione, da parte di chi dovrà utilizzare la mixed reality come strumento di supporto nelle sessioni lavorative, unita all'abbassamento degli errori durante le fasi di assemblaggio e ad una riduzione delle tempistiche di lavorazione, certifica la validità del progetto seguito. Inoltre, la chiarezza e la facilità di comprensione del nuovo sistema, così come descritto dai dati, rispetto al paper based, danno manforte allo sviluppo di questa tecnologia all'interno dell'azienda e ne certificano anch'essi la bontà del progetto.

5.3 Mixed Reality User Experience

Un altro dei questionari a cui gli utenti sono stati sottoposti riguarda l'esperienza di realtà mista vissuta. Questo questionario è composto da otto affermazioni sulle quali si esprime un parere in funzione di una graduatoria che va da "fortemente in disaccordo" a "fortemente d'accordo".

Tabella 9: MR User Experience e risultati

MR UX da 1 (fortemente in disaccordo) a 7 (fortemente d'accordo)
L'uso del visore ha ostacolato l'esecuzione dei task
Ritengo che il visore indossato sia invasivo
Dopo un po' che indossavo il visore mi sono dimenticato/a di averlo addosso
Indosserei volentieri i visori avendone percepito l'utilità
Mi sono sentito/a sotto pressione nello svolgere i task perché indossavo i visori
I visori mi hanno aiutato a non commettere errori
Indossare i visori mi ha provocato dei fastidi (nausea, mal di testa, etc.)
Ritengo che la realtà aumentata semplifichi il modo di lavorare
Consiglierei l'utilizzo dei visori per questa attività
Ritengo che questo tipo di innovazioni debba essere maggiormente considerato all'interno di un ambiente di lavoro
L'impiego della realtà aumentata favorisce la concentrazione
L'utilizzo dei visori mi consente di essere autonomo nell'apprendimento e nello svolgimento del mio lavoro

da 1 (fortemente in disaccordo) a 7 (fortemente d'accordo)						
User 1	User 2	User 3	User 4	User 5	User 6	User 7
3	2	1	2	1	1	5
4	2	1	3	1	1	5
5	6	5	7	4	2	1
6	5	5	5	6	7	4
1	2	1	1	1	1	6
3	6	5	7	7	5	4
1	1	1	1	2	1	1
7	7	7	7	7	7	6
7	7	7	7	7	7	6

6	7	7	6	7	7	7
7	5	7	7	6	6	5
5	6	7	7	7	5	6

Anche da questi risultati ottenuti si può notare come, anche se il giudizio cambi da persona a persona, nella maggior parte dei casi questa esperienza di realtà mista sia stata approvata dagli operatori. Infatti, nella tabella riportata si nota come il visore non risulti invasivo nelle varie operazioni, ma anzi la maggior parte degli intervistati avendone capito l'utilità, sarebbero disposti a riutilizzarlo. I giudizi più positivi al visore e all'applicazione vengono dati proprio per il supporto che danno nel non commettere errori e alla semplificazione che questo tipo di tecnologia abbia portato alle lavorazioni da eseguire. Tutti gli intervistati ritengono inoltre che questo tipo di innovazione debba essere introdotta nell'ambiente di lavoro, avendo dato votazioni tra il 6 e il 7, essendo quindi fortemente d'accordo con l'implementazione della mixed reality.

6 Sviluppi futuri

Come detto l'applicazione ad una prima prova risulta molto ben costruita e sembra essere una buona soluzione alle richieste di CNH Industrial. Dopo per aver testato la soluzione nel loro plant, però sono state notate delle piccole problematiche dovute principalmente al movimento della linea su cui vengono cablate le trasmissioni. Infatti, come si può immaginare, l'Azure Spatial Anchor ancora e fissa le informazioni nell'ambiente mappato. Proprio perché le informazioni sono fissate in determinati punti d'interesse non seguono la trasmissione che nel frattempo continua a spostarsi in avanti per arrivare alle postazioni successive.

Per eludere questa problematica è stata pensata una soluzione, definita temporizzata, che prevede però diverse informazioni fondamentali, come la velocità della linea di produzione e la necessità di standardizzare obbligatoriamente il procedimento di cablaggio per stabilire delle tempistiche effettive di ogni singola lavorazione. Avendo quindi a disposizione la velocità della linea, e dopo aver consultato il team leader di reparto riguardo le tempistiche generali di esecuzione di ogni fase di lavorazione, è stato deciso di distribuire ogni singola istruzione nello spazio, facendo in modo che ogniqualvolta l'operatore esegua il click sull'immagine l'informazione successiva compaia nel punto esatto dove si trova la trasmissione. La distribuzione delle informazioni avviene già nel software Unity, sfruttando l'unità di misura metrica del programma stesso. Un'altra modifica apportata riguarda le immagini di supporto all'operatore, le quali sono state sostituite da dei video che illustrano step by step la lavorazione da eseguire. Dopo un confronto con il personale dell'azienda, è sembrata quest'ultima soluzione una buona idea, in quanto anche la riproduzione automatica del video stesso comunque non comporta un motivo di distrazione per l'utente, ma lo sostiene ancora maggiormente rispetto alla semplice immagine dal commettere errori. Anche qui alla fine della lavorazione con un semplice click sul video si può passare facilmente all'istruzione successiva, che questa volta si troverà nel punto esatto in cui si trova la trasmissione.

Questa illustrata ora è ancora una soluzione in fase di sviluppo, che sicuramente otterrà delle notevoli migliorie nell'arco del tempo ,sperimentando e trovando nuove soluzioni.

7 Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto si basa sulla realizzazione di un'applicazione di mixed reality studiate per supportare gli operatori nelle fasi di cablaggio di trasmissioni di macchinari agricoli. Le richieste di CNH Industrial prevedevano lo sviluppo di una tecnologia che pian piano sempre più sta prendendo piede all'interno delle più grandi aziende in tutto il mondo. In particolare, è stato richiesto un sistema che permetta di avere una facile fruibilità di tutte le informazioni necessarie al cablaggio, ma con il minimo ingombro possibile, e che consentissero di dare una continuità di lavorazione all'utente stesso. Per questo la soluzione migliore è sembrata da subito quella di un'applicazione di realtà mista, sfruttando un Head Mount Display con lenti see-through. Infatti con questa tecnologia risulta semplice visualizzare in modo adeguato sia gli ologrammi creati con il software Unity, sia lo spazio circostante. Questo come si può immaginare è un aspetto fondamentale per la buona riuscita del progetto, in quanto permette all'operatore di tenere sott'occhio sia la trasmissione su cui deve andare ad eseguire la lavorazione, sia le informazioni per eseguire la lavorazione stessa. Inoltre evita anche i numerosi spostamenti che fino ad oggi un operatore deve fare per andare a consultare le istruzioni paper based, poiché si trovano in un'apposita postazione adiacente alla linea di montaggio.

Come detto l'applicazione viene prima sviluppata nel software Unity, andando a creare le informazioni necessarie e ancorarle a dei Parent Anchor dopo aver importato i pacchetti Mixed Reality Toolkit (MRTK) e Azure Spatial Anchor (ASA). Molto importante risulta la distribuzione di queste informazioni già nel software di sviluppo della scena, poiché nella soluzione sperimentata è stato deciso di associare ad ogni Parent Anchor almeno tre informazioni, che dovranno però essere già adeguatamente distanziate tra loro. Una volta caricata l'applicazione nei Microsoft HoloLens 2, l'utente si troverà di fronte la scena così come è stata creata in Unity. Sarà da quel momento che potrà andare ad interagire con i Parent Anchor per distribuirli negli specifici punti della trasmissione.

Una volta posizionati nel punto d'interesse basterà andarli a salvare nella posizione scelta. Come descritto precedentemente, per la creazione e il salvataggio e la ricerca degli ancoraggi, sono stati creati due appositi tasti, 'Create Anchors' e 'Find Anchors', in grado di eseguire tutti i passaggi necessari.

La possibilità di avere a disposizione delle immagini o dei brevi video su come l'operazione vada eseguita garantisce inoltre un abbassamento dei possibili errori durante i processi, e i test svolti hanno segnalato come ci sia stato anche un notevole abbassamento delle tempistiche. Queste nel computo finale conducono ad un risultato almeno a livello produttivo ottimo, che ottiene ancora più credibilità se a questo si associano i risultati dei questionari distribuiti agli operatori. Infatti, come si può notare nelle tabelle riportate nel Capitolo 5, sia nell'User Experience Questionnaire (EUQ), sia nel MR User Experience i cambiamenti trovati sono stati valutati molto positivamente.

In particolare, l'applicazione è risultata sin da subito molto comprensibile e dopo un breve tempo di adattamento alle gesture del visore anche la manualità ne è risultata comoda e per nulla faticosa. Una valutazione elevata è stata data anche per l'ordine con cui le informazioni vengono ricevute, chiare e soprattutto non confondibili, che ha condotto ad una notevole diminuzione degli errori. A primo impatto l'occhiale non è sembrato stancare troppo la vista dell'utente, aspetto fondamentale per la salute psico-fisica dell'operatore e per una buona riuscita delle lavorazioni.

Come detto la soluzione provata è stata così scelta dopo aver preso in considerazione numerosi software e metodi di tracciamento, ma dopo attente valutazioni sull'ambiente di lavoro e sull'esigenze dell'azienda indicate precedentemente questa è risultata essere la migliore.

Gli aspetti negativi, più che all'applicazione in se per se, sono legati alla durata della batteria dei Microsoft HoloLens 2, stimata per il momento a circa 3 ore e nel rischio di un errato tracciamento dell'ambiente e delle informazioni dovuto alla presenza di superfici nere lucide, che tendono a riflettere la luce e a mandare in errore i sensori di rilevamento della posizione. Questa problematica sorgeva però nella maggior parte delle soluzioni prese in considerazione, visto che questo tipo di superfici creano problemi alla maggior parte dei sensori di mapping spaziale. Inoltre il movimento della linea e quindi delle trasmissioni creano un altro scoglio importante all'applicazione e alla lavorazione, ma questo ostacolo sembra facilmente superabile con una soluzione già in fase di sviluppo, che è stata definita temporizzata, poiché sono state prese in considerazione sia la velocità della linea, sia le tempistiche di ogni singola lavorazione, per calcolare lo spostamento della trasmissione e quindi il punto esatto in cui visualizzare le istruzioni utili al montaggio.

Sicuramente la Mixed Reality è e sarà una delle soluzioni che cambieranno il futuro della tecnologia e dell'industrie in tutto il mondo, con una sempre più facile fruibilità di contenuti adatti allo sviluppo di tali applicazioni e ampi miglioramenti nei processi produttivi delle aziende, nei controlli qualità, nella sicurezza e anche nel training del nuovo personale da formare.

8 Bibliografia

- [1] T. Caudell e D. Mizell. "Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes". In: (1992). url: <http://ieeexplore.ieee.org/document/183317/> .
- [2] R. Azuma, «A Survey of Augmented Reality,» Presence: Teleoperators and Virtual Environments, vol. 6, n. 4, pp. 355-385, Aug. 1997. url: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2871077> .
- [3] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier e B. MacIntyre, «Recent advances in augmented reality,» Computer Graphics and Applications, vol. 21, n. 6, pp. 34 - 47, 2001.
- [4] S. Feiner, B. MacIntyre e D. Seligmann. "Annotating the real world with knowledge-based graphics on a see-through head-mounted display". In: (1992).
- [5] S. Feiner, B. MacIntyre e D. Seligmann. "Knowledge-based augmented reality". In: (1993). url: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=159587>
- [6] inserire link a taxonomy of...
- [7] R. Whitaker et al. "Object Calibration for Augmented Reality".
- [9] M. Xin, E. Sharlin e M. C. Sousa, «Napkin Sketch – Handheld Mixed Reality 3D Sketching,» Proceeding VRST '08 Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology, pp. 223-226 , 2008.
- [10] J. Park e H. Univ., «Augmented Reality Based Re-formable Mock-Up for Design Evaluation,» in Ubiquitous Virtual Reality, 2008. ISUVR 2008. International Symposium on, Gwangju, 2008.
- [11] H. Takahashi e T. Kawashima, «Touch-sensitive augmented reality system for development of handheld information appliances,» International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) , vol. 4, n. 1, pp. 25-33, 1 2 2010. 141
- [12] A. Olwal, J. Gustafsson e C. Lindfors, «Spatial augmented reality on industrial CNCmachines,» in The Engineering Reality of Virtual Reality 2008, 2008.

- [13] S. Li, T. Peng, C. Xu, Y. Fu e Y. Liu, «A Mixed Reality-Based Assembly Verification and Training Platform,» *Virtual and Mixed Reality*, vol. 5622, n. 5, pp. 576-585, 2009.
- [14] A. Boud, D. Haniff, C. Baber e S. Steiner, «Virtual Reality and Augmented Reality as a Training Tool for Assembly».
- [15] A. Tang, C. Owen, F. Biocca e W. Mou, «Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly,» *Proceedings of the ACM CHI 2003 Human Factors in Computing Systems (CHI2003)*, p. 73–80, 2003.
- [16] S. Ongb, J. Chonga e A. Neea, «A novel AR-based robot programming and path planning methodology,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 26, n. 3, p. 240–249, 2010.
- [17] G. A. Lee, H. Kang e W. Son, «MIRAGE: A Touch Screen Based Mixed Reality Interface for Space Planning Applications,» *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2008 (VR2008)*, p. 273– 274, 2008.
- [18] J. Leea, S. Hanb e J. Yangc, «Construction of a computer-simulated mixed reality environment for virtual factory layout planning,» *Computers in Industry*, vol. 62, n. 1, p. 86–98, 2011.
- [19] A. Neea, S. Onga, G. Chryssolourisb e D. Mourtzisb, «Augmented reality applications in design and manufacturing,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, n. 2, p. 657– 679, 2012.
- [20] Steven J. Henderson e Steven Feiner. Evaluating the Benefits of Augmented Reality for Task Localization in Maintenance of an Armored Personnel Carrier Turret. 2009. url: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5336486/> .
- [21] B. M. Khuong, K. Kiyokawa, A. Miller, J. J. La Viola, T. Mashita and H. Takemura, "The effectiveness of an AR-based context-aware assembly support system in object assembly," 2014 IEEE Virtual Reality (VR), 2014, pp. 57-62, url: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6802051/figures#figures>

[22] M. Koenig, M. Stadlmaier, T. Rusch, R. Sochor, L. Merkel, S. Braunreuther, J. Schilp, "MA(2)RA - Manual Assembly Augmented Reality" 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), url: <https://www-webofscience-com.ezproxy.cad.univpm.it/wos/woscc/full-record/WOS:000541902500100>

[23] Y. X. Zhang, J. Qi Cheng, J. Y. Wang and L. Zhao, "Co-assemble: A collaborative AR cross-devices teaching system for assemble practice courses," 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), 2021, pp. 512-513, url: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cad.univpm.it/document/9419187>

[24] Adolfo Muñoz, Xavier Mahiques, J. Ernesto Solanes, Ana Martí, Luis Gracia, Josep Tornero, "Mixed reality-based user interface for quality control inspection of car body surfaces.", 2019, pp. 75-92, url: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027861251930072X>

