



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA

- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN
COSTRUZIONI AERONAUTICHE

REGOLAZIONE E OTTIMIZZAZIONE DI UN FILTRO DI KALMAN PER IL TRACCIAMENTO DI VELIVOLI IN REALTÀ AUMENTATA

CANDIDATO

Andrea Roseti

RELATRICE

Prof.ssa Sara Bagassi

CORRELATORE

Ing. Tommaso Fadda

Abstract

Il ruolo del controllore del traffico aereo è di fondamentale importanza; tuttavia, in un contesto globale di costante incremento del volume di traffico, il suo carico di lavoro è conseguentemente aumentato. Dovendo quindi ricorrere a una maggiore gestibilità del lavoro che garantisca una completa sicurezza ed efficienza nelle operazioni di traffico aereo, obiettivo sempre primario, questa tesi descrive l'implementazione di una piattaforma operante in Realtà Aumentata che permetta al controllore di visualizzare in tempo reale i dati relativi agli aeromobili tramite interfacce virtuali che seguono il velivolo nella sua traiettoria, in modo quindi da diminuire il carico di lavoro ed i rischi dovuti ad un costante distoglimento dello sguardo da ciò che avviene all'esterno della torre di controllo, per le operazioni di sorveglianza da svolgere con un contatto visivo sui monitor presenti nella postazione operativa del controllore.

In particolare, questa tesi si focalizza sulla scelta di algoritmi che ottimizzino il tracciamento e la predizione delle traiettorie dei velivoli in area aeroportuale, per migliorare l'allineamento tra l'overlay in Realtà Aumentata e la vista esterna della torre.

Inoltre, si presta particolare attenzione in fase di studio all'ottimizzazione degli algoritmi, i quali corrispondono a due modelli matematici distinti di filtri di Kalman per la gestione dei movimenti sui piani orizzontale e verticale, realizzata con l'implementazione di un corretto tuning delle variabili presenti.

I risultati finali ottenuti mostrano un comportamento ottimale del velivolo nella fase di traiettoria rettilinea in rullaggio e in decollo o atterraggio, mentre invece particolari criticità emergono in fase di traiettoria curvilinea, specialmente se essa viene effettuata a basse velocità o per curve piuttosto brusche, a causa della complessità intrinseca al tuning del filtro, il quale deve trovare un compromesso al fine di bilanciare la gestione delle diverse situazioni di manovra.

Indice

Elenco delle Figure	5
Elenco delle Tabelle	6
1 Introduzione	7
1.1 Struttura della tesi	8
2 Air Traffic Management (ATM)	10
2.1 Principi di controllo del traffico aereo	10
2.1.1 Servizi del Traffico Aereo (ATS)	11
2.1.2 Classificazione degli spazi aerei	13
2.2 Controllo del traffico aereo di Torre	17
2.2.1 La figura del controllore di Torre	18
2.3 Sistemi di sorveglianza del traffico aereo	19
2.3.1 Il sistema ADS-B	21
3 Extended Reality (XR)	25
3.1 La realtà aumentata (AR)	28
4 La Realtà Aumentata nel controllo del traffico aereo	30
4.1 SESAR (Single European Sky ATM Research)	30
4.2 Implementazione della Realtà Aumentata in Torre di Controllo	32
4.2.1 Progetto RETINA	32
4.2.2 Progetto DTT (Digital Technologies for Towers)	35
4.3 Sviluppo della Realtà Aumentata nel mondo reale	37
4.3.1 Limitazioni dell'applicazione dell'AR al mondo reale	40

5 Metodi di tracciamento e predizione della traiettoria degli aeromobili in area aeroportuale	42
5.1 Metodo Map Matching	42
5.2 Filtro di Kalman, struttura e funzionamento	44
5.2.1 Filtro di Kalman Esteso (EKF)	48
5.2.2 Filtro di Kalman Unscented (UKF)	49
5.3 Scelta e struttura del filtro di Kalman per il problema di tracciamento e predizione	50
5.3.1 Filtro orizzontale EKF con modello Constant Turn Rate and Velocity (CTRV)	50
5.3.2 Filtro verticale standard con modello Constant Acceleration (CA)	53
5.4 Tuning dei parametri	54
 6 Implementazione del Filtro di Kalman e risultati ottenuti	56
6.1 Strumenti utilizzati.....	56
6.1.1 Unity e Visual Studio	56
6.1.2 Visore Microsoft HoloLens 2	58
6.2 Implementazione del filtro di Kalman su Unity	59
6.2.1 Adattamento del tuning al moto degli aeromobili	61
6.3 Risultati finali ottenuti	66
 7 Conclusioni	72
 Bibliografia	74

Elenco delle figure

2.1	Struttura dell’Air Traffic Management	10
2.2	Suddivisione delle FIR e degli ACC in Italia	15
2.3	Esempio di suddivisione degli spazi aerei	16
2.4	Torre di Controllo dell’Aeroporto di Bologna “G. Marconi”	17
2.5	Postazioni dei controllori TWR e GND	18
2.6	Composizione di un messaggio ADS-B	22
3.1	Descrizione del termine XR e principali differenze tra AR, MR e VR	25
3.2	Visore VR.....	26
3.3	Esempio di interfaccia AR ottenuta tramite smartphone	27
3.4	Interfaccia di Realtà Mista.....	28
3.5	Interfaccia di Realtà Aumentata nell’applicazione FlightRadar24	29
4.1	Controllore del Traffico Aereo con HMD e relativa interfaccia visualizzabile.....	33
4.2	Laboratorio di Realtà Virtuale e di Simulazione dell’Università di Bologna	36
4.3	Architettura della piattaforma AR implementata nel mondo reale	38
4.4	Visualizzazione delle label relative agli aeromobili tramite dispositivo HoloLens 2	39
4.5	Ritardo nel posizionamento della label rispetto alla posizione del relativo aeromobile	40
5.1	Esempio di tracciamento della traiettoria di taxi di un velivolo secondo il metodo del Map Matching	44
6.1	Interfaccia del programma Unity 3D	57
6.2	Esempio di interfaccia di Microsoft Visual Studio	58
6.3	Visore Microsoft HoloLens 2	58
6.4	Esempio di velivoli in traiettoria rettilinea all’interno di una simulazione Unity	67
6.5	Esempio di velivolo in traiettoria curvilinea in uscita dalla via di rullaggio per recarsi al gate di destinazione	69
6.6	Esempio di velivolo in procinto di allinearsi in testata pista per il decollo, ma in ritardo nell’inizio della manovra reale	70

Elenco delle tabelle

2.1	Classificazione ICAO degli spazi aerei	14
2.2	Struttura del messaggio ADS-B per numero di bit	22
2.3	ADS-B Type Code e relativo contenuto	22
2.4	Frequenze di trasmissione dei messaggi ADS-B	23

1 Introduzione

Il traffico aereo internazionale è in costante crescita, ciò fa seguito ad un aumento della domanda dovuto al fenomeno della globalizzazione economica e sociale che è stato sempre più rilevante negli ultimi decenni. Dati ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile) riportano nell'ultimo report trimestrale relativo al secondo trimestre del 2025 importanti dati di traffico passeggeri a livello italiano, con volumi complessivi pari a 63,2 milioni, dunque con aumento del 5% rispetto allo stesso periodo del 2024 e del 22% rispetto al 2019, ovvero rispetto al periodo pre-pandemia [1].

Questo aumento in termini di quantità di voli che vengono gestiti quotidianamente, si ripercuote inevitabilmente sulle figure professionali dei controllori del traffico aereo, i quali si trovano a fronteggiare un carico di lavoro sempre più in crescita, aumentando così il fattore di rischio.

Per gestire in sicurezza questa notevole mole di traffico, sono richieste dunque nuove strategie rispetto a quelle adottate in anni passati dove il volume di traffico era minore. In questo viene incontro il progresso tecnologico che sta avendo luogo negli ultimi anni, il quale apre le porte a nuove soluzioni adottabili in tutti gli ambiti lavorativi, e quindi anche nell'ambito del controllo del traffico aereo.

In particolare, tra le varie proposte tecnologiche per ottenere l'alleggerimento del carico di lavoro del controllore di torre, trova spazio la Realtà Aumentata (AR), la quale permette al controllore del traffico aereo di visualizzare in tempo reale in modo interattivo tramite delle label posizionate sui velivoli in un *out-of-the-window view* (OTW) tutte le informazioni cruciali riguardanti i relativi aeromobili di cui egli deve disporre per svolgere il proprio ruolo.

È proprio in questa direzione che si è mosso il gruppo di ricerca in "Tecnologie digitali e metodi di progetto per applicazioni aerospaziali" dell'Università di Bologna con i progetti RETINA (Resilient Synthetic Vision for Advanced Control Tower Air Navigation Service Provision) [2] e DTT (Digital Technologies for Tower) [3], entrambi finanziati da SESAR (Single European Sky ATM Research) [2] [3], i quali hanno sviluppato delle soluzioni in Realtà Aumentata visualizzabili dai controllori tramite visori HoloLens, che sono poi state validate in un ambiente simulato.

Successivamente, l'Università di Bologna ha applicato il concetto della Realtà Aumentata in ambiente reale, testando per la prima volta la piattaforma presso la Torre di Controllo dell'Aeroporto di Bologna. L'applicazione, il cui funzionamento è corretto, ha tuttavia presentato alcuni limiti interfacciandosi con il mondo reale. Essi sono in particolare relativi alla frequenza di

aggiornamento e alle lacune di segnale in certi punti dell'aeroporto dei dati provenienti dall'antenna ADS-B utilizzati dalla piattaforma per visualizzare le informazioni degli aeromobili. Queste limitazioni dell'antenna, dunque, influiscono direttamente sulle label assegnate a ciascun aeromobile che contengono i dati provenienti dall'ADS-B. Esse vengono visualizzate dal controllore del traffico aereo al di sopra del corrispondente aeromobile e, a causa delle problematiche sopra citate, si ottiene un movimento discreto e di conseguenza poco fluido delle label che tendono a non seguire in maniera ottimale gli aeromobili.

Inoltre, un precedente lavoro di tesi ha affrontato il problema a livello preliminare, introducendo semplici interpolazioni lineari nell'intervallo di tempo che intercorre tra due successive ricezioni di messaggi ADS-B per predire il movimento dell'aereo e dunque, di conseguenza, della label. Tuttavia, i risultati ottenuti non sono sufficienti per la risoluzione del problema, dal momento che il movimento effettivo dell'aereo è più complesso di quello predetto, portando dunque a grandi errori in alcune fasi di taxi.

Lo scopo di questa tesi è dunque quello di continuare il lavoro di progetto andando a implementare nuovi algoritmi di tracciamento e predizione della traiettoria degli aeromobili in area aeroportuale con l'obiettivo di migliorare la fluidità e la continuità del movimento delle label in modo che seguano in maniera ottimale l'aeromobile, aumentando così l'efficacia e la fruibilità della piattaforma sviluppata di Realtà Aumentata.

1.1 Struttura della tesi

Per una comprensione più chiara della tesi in oggetto, viene fornita una panoramica della sua struttura.

Nel capitolo 2 si introduce il concetto di Air Traffic Management (ATM) e vengono presentate le nozioni principali del controllo del traffico aereo, in particolare arrivando alla gestione del traffico aereo in una torre di controllo aeroportuale, ambiente in cui trova operatività il programma discusso. Nel capitolo 3 viene introdotto in maniera teorica il tema di Extended Reality (XR) nel quale risiede il concetto di Realtà Aumentata (AR); successivamente, nel capitolo 4, vengono presentati i principali progetti di ricerca che hanno coinvolto l'Università di Bologna relativamente allo sviluppo della piattaforma AR, viene quindi introdotta l'implementazione dell'AR in un ambiente reale come la torre di controllo aeroportuale e vengono infine descritte le principali

limitazioni emerse nel tracciamento dei velivoli. Nel capitolo 5 vengono proposti con dei fondamenti teorici i metodi di tracciamento e predizione delle traiettorie dei velivoli che possono essere implementati per far fronte alle limitazioni precedentemente descritte, focalizzando in particolare l'attenzione sul metodo scelto, ovvero il filtro di Kalman, descrivendone i modelli utilizzati. Nel capitolo 6 vengono invece illustrati gli strumenti utilizzati per lo sviluppo del progetto di tesi, il metodo di implementazione del filtro di Kalman nel programma, il tuning effettuato e le relative motivazioni e, infine, la presentazione dei risultati ottenuti, le principali criticità emerse e i margini di miglioramento.

2 Air Traffic Management (ATM)

In questo capitolo verranno presentati alcuni concetti chiave relativi all’Air Traffic Management (ATM), il quale è definito dall’International Civil Aviation Organization (ICAO) come “la gestione dinamica e integrata del traffico e dello spazio aereo che comprende i servizi al traffico aereo, la gestione dello spazio aereo e la gestione del traffico aereo, condotta in modo sicuro, economico ed efficiente tramite la predisposizione di infrastrutture e servizi senza interruzioni in collaborazione con tutte le parti coinvolte nelle operazioni di volo e di terra” [4].

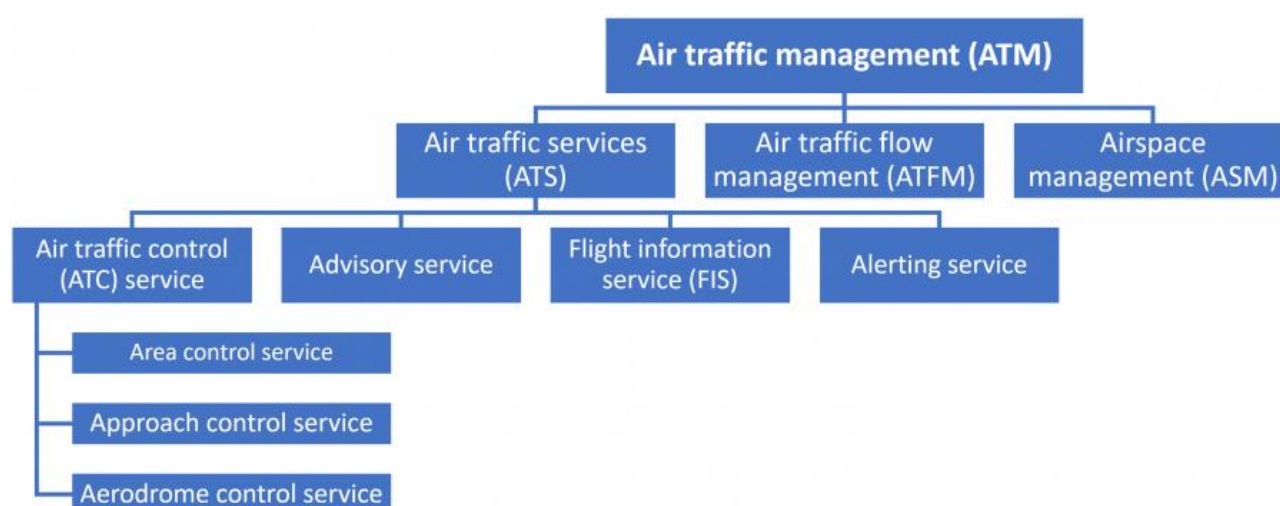


Fig. 2.1 Struttura dell’Air Traffic Management

2.1 Principi di controllo del traffico aereo

Questa sezione introdurrà il concetto del controllo del traffico aereo descrivendone la struttura e la classificazione in termini di gestione dello spazio e del traffico aereo e di servizi forniti, in modo da avere una base teorica per gli argomenti trattati nella tesi.

Il Controllo del Traffico Aereo, in inglese Air Traffic Control (ATC), è un concetto ampio che comprende l’insieme delle regole e dei servizi destinati a garantire un flusso regolare e sicuro di aerei nello spazio aereo e nelle vicinanze degli aeroporti. Viene regolato a livello globale dall’ICAO (International Civil Aviation Organization), un’agenzia delle Nazioni Unite istituita nel 1944 che stabilisce le norme e le procedure per la navigazione aerea internazionale [5].

In Italia il traffico aereo viene gestito 24 ore su 24 dall'ENAV S.p.A. (Ente Nazionale per l'Assistenza al Volo), tramite 45 torri di controllo e 4 centri di controllo d'area (ACC) presenti sul territorio nazionale [6].

Il controllo del traffico aereo viene esercitato dalle figure professionali dei controllori del traffico aereo, i quali possiamo suddividere principalmente in tre diverse categorie, in ognuna delle quali è possibile che a loro volta vengano definiti ruoli differenti per soddisfare particolari esigenze di traffico aereo o di spazio aereo servito. Riconosciamo dunque [7] :

- **Controllori di torre**, i quali forniscono il servizio di controllo del traffico aereo in aerodromo e nelle sue vicinanze (Sezione 2.2.1);
- **Controllori di avvicinamento**, i quali forniscono il servizio di controllo del traffico aereo per gli aeromobili in partenza e in arrivo. Sono il collegamento fra i controllori di torre e i controllori di area;
- **Controllori di area**, (chiamati anche controllori *en-route*), i quali forniscono il servizio di controllo del traffico aereo per gli aeromobili in fase di crociera.

Per avere una migliore comprensione dell'ambito di operatività di queste figure, si descriverà nel dettaglio i servizi da essi forniti e la divisione dello spazio aereo secondo la quale operano.

2.1.1 Servizi del Traffico Aereo (ATS)

Il Servizio del Traffico Aereo, in inglese Air Traffic Service (ATS), è un termine generico che può rappresentare il servizio di informazioni volo, il servizio di allarme, il servizio consultivo o il servizio di controllo del traffico aereo (che può essere servizio di controllo di area, servizio di controllo di avvicinamento o servizio di controllo di aerodromo) [4].

Gli obiettivi degli ATS sono come definiti dall'annesso 11 dell'ICAO [8] :

- a) Prevenire collisioni tra gli aeromobili;
- b) Prevenire collisioni tra gli aeromobili nell'area di manovra e impedimenti in quell'area;
- c) Snellire e mantenere un flusso ordinato del traffico aereo;
- d) Fornire consulto e informazioni utili per la condotta sicura ed efficiente dei voli;
- e) Notificare le organizzazioni appropriate in merito ad aeromobili che necessitano di soccorso e assistenza per la ricerca e il salvataggio, e assistere tali organizzazioni secondo necessità.

Di seguito vengono presentati i servizi del traffico aereo nel dettaglio [9] :

Air Traffic Control Service (ATCS), è il servizio di controllo del traffico aereo, ed è fornito da un ente ATC.

A seconda dello spazio aereo controllato l'ente ATC può essere (Sezione 2.1.2):

- **TWR** (Tower), se controlla il traffico aeroportuale;
- **APP** (Approach), se controlla il traffico di avvicinamento;
- **ACC** (Area Control Centre), se controlla il traffico di area.

Il servizio ATCS fornito da questi enti è dunque diretto a separare in termini di distanza (separazione orizzontale) o livelli (separazione verticale) gli aeromobili sotto il proprio controllo, attraverso le diverse forme previste dalla classificazione degli spazi aerei (Sezione 2.1.2).

Il servizio ATCS può essere fornito in modo:

- **A vista**, metodo usato dalla TWR nella gestione del traffico di aeroporto;
- **Procedurale**, metodo usato dall'APP e dall'ACC, basato sui riporti di posizione effettuati dai piloti;
- **RADAR**, Attraverso l'osservazione diretta degli aeromobili sullo schermo radar, se gli enti ATC (APP – ACC) sono provvisti di tale apparato.

Flight Information Service (FIS), è il servizio di informazioni volo, ed è istituito allo scopo di fornire ai piloti tutte le informazioni utili (meteo, notams, informazioni di traffico, inefficienze delle radioassistenze, ...) per una sicura ed efficiente condotta dei voli. All'interno di esso rientrano gli specifici servizi di Traffic Information (TFCI), ovvero informazioni emesse dall'ente per allertare un pilota circa altro traffico conosciuto e osservato che può trovarsi in prossimità della sua posizione o della sua prevista rotta di volo e per aiutare il pilota a evitare una collisione; e di Traffic Avoidance Advice (TFCAA), ovvero suggerimenti forniti dall'ente che specificano manovre per assistere un pilota nell'evitare una collisione [10].

Rientra in questa categoria anche l'AFIS (Aerodrome Flight Information Service), il quale è il servizio informazioni volo fornito al traffico di aeroporto sugli aeroporti non controllati.

Alerting Service (ALS), è il servizio di allarme, ha lo scopo di allertare gli appropriati organi di Ricerca e di Soccorso per gli aeromobili che necessitano di assistenza durante o a seguito di una fase di emergenza.

Advisory Service (ADS), è il servizio consultivo, istituito nelle Advisory Route (ADR), spazi aerei in cui il servizio informazioni volo e allarme sono insufficienti, ma le esigenze non giustificano il ricorso al servizio di controllo. Questo servizio ha lo scopo di fornire, nei limiti del possibile, la separazione agli aeromobili che operano in volo strumentale (IFR, Instrumental Flight Rules). L'ente che fornisce il servizio consultivo è l'ACC [10].

2.1.2 Classificazione degli spazi aerei

Gli spazi aerei sono distinti in sette categorie, o meglio classi, distinte alfabeticamente dalla lettera A alla lettera G. La A indica il livello più restrittivo di utilizzo dello spazio aereo, la classe G quello più libero. Gli spazi aerei classificati da A ad E sono detti spazi aerei controllati perché al loro interno viene fornito il Servizio di Controllo del Traffico Aereo (ATCS), mentre gli spazi aerei classificati F e G sono detti non controllati, e al loro interno viene fornito solo il Servizio di Informazioni Volo e il Servizio di Allarme (FIS e ALS). Nella fattispecie la classe F individua spazi aerei in cui viene fornito il Servizio Consultivo ai voli IFR che ne fanno richiesta [10].

La tabella 2.1 mostra le 7 classi e sintetizza le condizioni secondo cui i piloti debbano condurre i voli in IFR (volo strumentale) e in VFR (volo a vista, Visual Flight Rules), e gli enti ATS che forniranno loro i servizi.

La classificazione ICAO degli spazi aerei è descritta nell'annesso 11 [8] :

- **Classe A**, sono permessi solo voli IFR, a tutti gli aerei viene fornito il servizio di controllo del traffico aereo e sono tutti separati fra loro;
- **Classe B**, sono permessi voli IFR e VFR, a tutti gli aerei viene fornito il servizio di controllo del traffico aereo e sono tutti separati fra loro;
- **Classe C**, sono permessi voli IFR e VFR, a tutti gli aerei viene fornito il servizio di controllo del traffico aereo e i voli IFR sono separati dagli altri IFR e dai voli VFR. I voli VFR sono separati dai voli IFR e ricevono informazioni di traffico rispetto agli altri VFR;
- **Classe D**, sono permessi voli IFR e VFR, a tutti gli aerei viene fornito il servizio di controllo del traffico aereo e i voli IFR sono separati dagli altri IFR e ricevono informazioni di traffico rispetto ai voli VFR. I voli VFR ricevono informazioni di traffico rispetto a tutti gli altri voli;

- **Classe E**, sono permessi voli IFR e VFR, ai voli IFR viene fornito il servizio di controllo del traffico aereo e sono separati dagli altri IFR. Tutti i voli ricevono informazioni di traffico per quanto possibile. La classe E non può essere istituita nelle Zone di Controllo (Control Zone);
- **Classe F**, sono permessi voli IFR e VFR, tutti i voli IFR ricevono il Servizio Consultivo e tutti i voli ricevono informazioni di volo se richieste;
- **Classe G**, sono permessi voli IFR e VFR e tutti ricevono informazioni di volo se richieste.

Tab. 2.1 Classificazione ICAO degli spazi aerei

Classe	Tipo di volo	Separazione fornita	Servizio fornito	Limitazioni di velocità	Capacità radio	Contatto radio bilaterale	Autorizzazione ATC
A	IFR	Tutti	ATCS	NO	SI	SI	SI
B	IFR VFR	Tutti	ATCS	NO	SI	SI	SI
C	IFR VFR	IFR/IFR IFR/VFR VFR/IFR	ATCS ATCS (VFR/VFR: TFCL, TFCAA)	NO 250 kts se < 3050 m AMSL	SI	SI	SI
D	IFR VFR	IFR/IFR NO	ATCS (IFR/VFR: TFCL, TFCAA) ATCS (IFR/VFR E VFR/VFR: TFCL, TFCAA)	250 kts se < 3050 m AMSL	SI	SI	SI
E	IFR VFR	IFR/IFR NO	ATCS (IFR/VFR: TFCL) TFCL, FIS	250 kts se < 3050 m AMSL	SI NO	SI NO	SI NO
F	IFR VFR	IFR/IFR NO	ADVS, FIS Se richiesto TFCL, FIS	250 kts se < 3050 m AMSL	SI NO	SI NO	NO
G	IFR VFR	NO	FIS se richiesto	250 kts se < 3050 m AMSL	SI NO	SI NO	NO

L'ICAO lascia a ogni Stato la libertà di adottare solo le classi che, in base alle esigenze locali, permettono l'organizzazione più razionale dello spazio aereo nazionale [10].

Lo spazio aereo italiano è classificato, secondo gli standard ICAO, nelle classi: A, C, D, E e G; le classi B e F sono adottate ma non implementate.

Verticalmente invece, considerando che un Flight Level (FL) è pari a 100 piedi di quota, lo spazio aereo è suddiviso in:

- **FIR (Flight Information Region)**, da terra (Ground, GND, o Surface, SFC) a FL 195 incluso;
- **UIR (Upper Information Region)**, al di sopra di FL 195.

Lo spazio aereo italiano è suddiviso in tre FIR / UIR: Milano, Roma e Brindisi.

La FIR è classificata G, dunque è non controllata e viene fornito solo servizio di informazioni e allarme. L'ente che fornisce questo servizio è il FIC (Flight Information Centre) [10] [11].

La UIR è invece ulteriormente suddivisa in due porzioni diversamente classificate :

- Da FL 195 escluso a FL 660 incluso: classe C;
- Da FL 660 escluso in poi: classe G.



Fig. 2.2 Suddivisione delle FIR e degli ACC in Italia

All'interno delle FIR / UIR esistono spazi aerei specifici, i quali sono classificati in base al servizio fornito. Partendo dallo spazio aereo più ristretto andando verso quello più ampio si hanno [9] [10] :

- **ATZ (Aerodrome Traffic Zone)**, è uno spazio aereo di forma cilindrica di definite dimensioni, solitamente 2000 ft di altezza e 5 NM (Miglia Nautiche) di raggio, istituito intorno ad un aerodromo a protezione del traffico di aerodromo. L'ente di controllo dell'ATZ è la TWR (verrà approfondito nelle sezioni 2.2 e 2.2.1).

- **CTR (Control Zone)**, è uno spazio aereo controllato che si estende verso l'alto a partire dalla superficie del suolo, fino ad un limite superiore specificato. Viene esercitato il servizio di controllo del traffico aereo ad aeromobili nelle fasi iniziali di volo in partenza, oppure ad aeromobili che eseguono le procedure per l'avvicinamento e l'atterraggio. Al suo interno la CTR può contenere diversi ATZ. L'ente di controllo della CTR è l'APP.
- **TMA (Terminal Area)**, è uno spazio aereo controllato istituito normalmente alla confluenza delle rotte ATS nelle vicinanze di uno o più aeroporti importanti, racchiudendo così i CTR dei maggiori aeroporti commerciali. In Italia troviamo due TMA: Milano e Roma. A causa dell'alto traffico presente in queste aree per via della vicinanza fra loro di diversi aeroporti, viene istituito questo ulteriore spazio aereo a protezione. L'ente di controllo della TMA è l'ACC.
- **AWY (Airway)**, è un'area controllata o una porzione di essa, a forma di corridoio, opportunamente equipaggiata con radioassistenze per la navigazione strumentale. Le Aerovie (AWY) permettono dunque ai voli IFR di rimanere in uno spazio aereo controllato per tutta la fase del volo in rotta, sino a quando essi non entrano nelle TMA o CTR degli aeroporti di destinazione. L'ente di controllo delle AWY è l'ACC.
- **CTA (Control Area)**, è uno spazio aereo controllato, che solitamente comprende la TMA e le AWY nei pressi dell'aeroporto. L'ente di controllo della CTA è l'ACC.

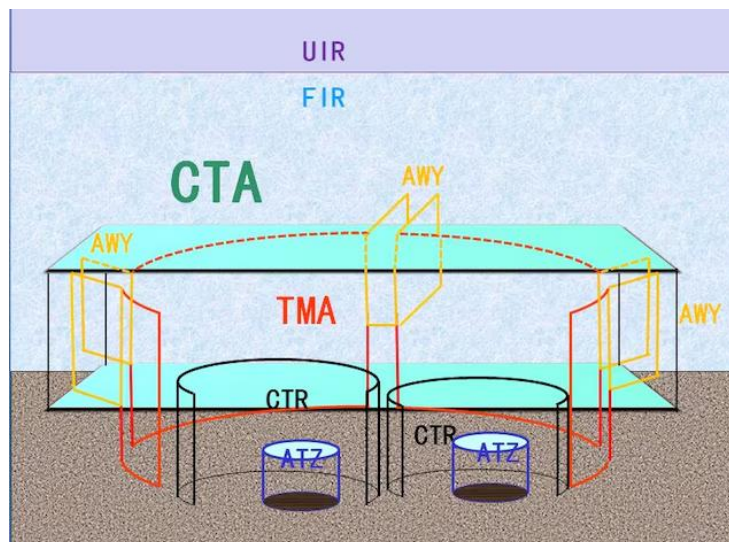


Fig. 2.3 Esempio di suddivisione degli spazi aerei

2.2 Controllo del traffico aereo di Torre

La Torre di Controllo gestisce il traffico aereo nella Zona di Traffico Aeroportuale (ATZ), e il suo nominativo è “Tower” (TWR). Lo scopo dell’ATZ è dunque della Torre di Controllo è quello di contenere il traffico di aeroporto, costituito dagli aeromobili e dai veicoli che operano sull’area di manovra, e dagli aeromobili in volo nelle vicinanze dell’aeroporto. Per definizione ICAO, un aeromobile è considerato nelle vicinanze di un aeroporto quando si trova nel circuito di traffico aeroportuale, o quando sta entrando o uscendo dallo stesso [10].

La Torre fornisce il servizio di controllo di aeroporto con l’emissione di autorizzazioni e informazioni per gli aeromobili sotto il proprio controllo allo scopo di ottenere un sicuro, rapido e ordinato flusso del traffico operante nell’ATZ, e di prevenire le collisioni tra [4] :

- a) Aeromobili nel circuito di traffico in volo;
- b) Aeromobili in movimento sull’area di manovra;
- c) Aeromobili in atterraggio e decollo;
- d) Aeromobili e veicoli in movimento sull’area di manovra;
- e) Aeromobili in movimento sull’area di manovra e ostacoli su di essa presenti.

Il controllore del traffico aereo di Torre è la figura che dunque gestisce il traffico aereo aeroportuale, di seguito si descriverà il suo ruolo più nel dettaglio.



Fig. 2.4 Torre di Controllo dell’Aeroporto di Bologna “G. Marconi”

2.2.1 La figura del controllore di Torre

Il controllore di Torre gestisce il traffico aereo a vista, deve dunque mantenere il contatto visivo su tutte le operazioni di volo sull'aerodromo e nelle vicinanze di esso, così come sui veicoli e sul personale presente sull'area di manovra. L'osservazione a vista deve essere compiuta mediante un contatto visivo diretto con l'ambiente esterno al di fuori delle vetrate di Torre, oppure mediante osservazione indiretta utilizzando un sistema di sorveglianza visivo specifico approvato per lo scopo da parte di un ente ATS [4].

A seconda del volume di traffico presente e della tipologia di aeroporto, i controllori di Torre possono svolgere mansioni diverse, talvolta anche dividendosi in più settori in situazioni di alto carico di lavoro.

Quando il volume del traffico di aeroporto è ritenuto tale da giustificare la fornitura del servizio di controllo del traffico aereo, l'ATZ viene posta sotto la giurisdizione TWR (Torre), che è appunto l'ente ATC che fornisce il servizio di controllo del traffico aereo, il servizio informazioni volo e il servizio di allarme sia al traffico IFR che al traffico VFR.

Sugli aeroporti di maggior traffico, il controllo degli aeromobili e dei veicoli che operano sull'area di manovra viene demandato a un apposito ente denominato "Ground Control" (Controllo dei Movimenti al Suolo). Il controllore Ground (GND), dunque, non si occupa degli aeromobili quando essi sono in pista o nelle vicinanze dell'aeroporto, e opera su una frequenza VHF (Very High Frequency) diversa da quella di Torre.

In caso di aeroporti particolarmente trafficati è istituita un'ulteriore posizione denominata "Delivery", il cui compito è solo quello di verificare la correttezza dei dati del piano di volo, la compatibilità dell'orario di richiesta di messa in moto e fornire dunque la clearance di uscita e di messa in moto all'aeromobile [10].



Fig. 2.5 Postazioni dei controllori TWR e GND

Le tre figure, controllore Tower, controllore Ground e controllore Delivery, collaborano fra di loro fornendo al pilota la nuova frequenza al momento del passaggio di giurisdizione da una postazione all'altra.

In un aeroporto controllato quindi gli aeromobili sono soggetti alle autorizzazioni da parte della TWR, le quali sono [8] :

- Per aeromobili al suolo:
 - Autorizzazione per la messa in moto (Start-up);
 - Autorizzazione per il pushback;
 - Autorizzazione per iniziare il rullaggio sull'area di manovra (Taxi);
 - Autorizzazione per entrare in pista;
 - Autorizzazione per il decollo (Take-off).
- Per aeromobili in volo:
 - Autorizzazione per entrare nell'ATZ;
 - Autorizzazione per entrare nei circuiti di traffico o direttamente in finale;
 - Autorizzazione per attraversare i prolungamenti asse pista o i circuiti di traffico;
 - Autorizzazione per l'atterraggio (Landing).

Quando il volume di traffico che interessa un aeroporto non giustifica la presenza di una TWR, nell'ATZ, che in questi casi viene classificato G, viene istituito un servizio AFIS (Aerodrome Flight Information Service) fornito dall'AFIU (Aerodrome Flight Information Unit). Questo ente fornisce il servizio di informazioni volo e il servizio di allarme, ma non il servizio di controllo del traffico aereo; dunque, le informazioni emesse hanno carattere puramente informativo e non costituiscono autorizzazione, saranno gli equipaggi di condotta che, in base alle informazioni ricevute, decideranno le azioni da intraprendere nel rispetto della sicurezza [9].

2.3 Sistemi di sorveglianza del traffico aereo

Nel contesto ATM la sorveglianza è la tecnica per la rilevazione tempestiva dei target (aeromobili), la determinazione della loro posizione, l'acquisizione di informazioni aggiuntive se necessaria, e la

consegna tempestiva di queste informazioni ai soggetti deputati al controllo, per un sostegno sicuro e un'opportuna separazione dei target all'interno dello spazio aereo di interesse.

I principali sistemi di sorveglianza utilizzati nel controllo del traffico aereo sono [9] :

- **Radar Primario**, è un sistema composto da un trasmettitore ed un ricevitore, quest'ultimo è collegato ad un indicatore che presenta la traccia dell'aeromobile in volo sul display radar. Gli impulsi radar emessi dal trasmettitore a intervalli regolari colpiscono l'aereo e ritornano indietro al ricevitore, in base alla direzione di ricezione e al tempo impiegato per ritornare indietro, viene definita la direzione, la posizione e la distanza dell'aeromobile. Il radar primario non fornisce dunque nessuna indicazione circa l'identità dell'aeromobile.
- **Radar Secondario**, è un sistema costituito da un interrogatore di terra, un risponditore a bordo dell'aeromobile, detto Transponder, e un ricevitore di terra. Esso è co-ubicato con il trasmettitore del Radar Primario, e fornisce informazioni supplementari sull'aeromobile che arrivano dal Transponder di bordo, il quale risponderà all'interrogazione del radar. Il Transponder ha diversi modi, i quali distinguono le informazioni che esso fornisce:
 - **Modo A**, restituisce un codice identificativo dell'aeromobile a 4 cifre, da 0 a 7, fornito dal controllore del traffico aereo prima della partenza;
 - **Modo C**, restituisce, oltre al codice identificativo, il livello di volo dell'aeromobile;
 - **Modo S**, è un'interrogazione "selettiva", cioè gli aerei vengono interrogati dal radar singolarmente con un treno di impulsi più lungo in modo da ottenere più informazioni sul volo. Il codice identificativo inoltre non è più a 4 cifre ma un indirizzo a 24 bit univoco per ogni aeromobile, in modo che le possibili combinazioni utilizzabili salgano da 4096 a oltre 16 milioni.
- **Multilaterazione**, è un sistema basato sul calcolo delle differenze di tempo in cui un segnale, emesso dal Transponder di bordo dell'aeromobile, viene captato da stazioni di rilevamento a terra. Il risultato di tali elaborazioni rileva la posizione esatta dell'aeromobile [12].
- **ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast)**, è un sistema per il quale l'aeromobile fornisce in maniera automatica e continua tutte le informazioni contenute all'interno del messaggio Transponder di Modo S, oltre che la sua posizione GPS (Global Positioning System), a tutti i ricevitori di terra dotati di antenna ADS-B (Sezione 2.3.1).

2.3.1 Il sistema ADS-B

In questa sezione si approfondirà la struttura e il funzionamento del sistema ADS-B, poiché è il sistema usato dall'applicazione discussa in questa tesi per ricevere i dati dagli aeromobili.

La tecnologia radar presenta svariate limitazioni, fra le quali troviamo copertura limitata, inattendibilità dei segnali a basse latitudini, zone d'ombra legate all'orografia del suolo, problemi legati alla rotazione dell'antenna radar e, soprattutto, l'impossibilità di posizionare le relative strutture su territori inaccessibili o in alto mare che ha costretto in tali aree a fornire il servizio di controllo con il metodo procedurale. Il sistema ADS-B viene incontro nella risoluzione di ciascuno di questi problemi, grazie alla sua copertura satellitare e al funzionamento automatico [9].

Il significato di ADS-B è difatti:

- **Automatic**, non è richiesto alcun input da parte del pilota;
- **Dependent**, dipende dagli strumenti di navigazione dell'aeromobile;
- **Surveillance**, è un sistema di sorveglianza, dove sul display ADS-B vengono rappresentati tutti i dati dell'aeromobile come posizione, livello di volo, velocità, ... ;
- **Broadcast**, vi è un'emissione continua delle informazioni ADS-B, qualunque stazione in aria o al suolo potrà ricevere i segnali ADS-B se opportunamente equipaggiata.

Gli elementi principali che compongono questo sistema di sorveglianza sono [9] :

- Il sistema satellitare, il quale fornisce i segnali corretti sulla base dei quali gli aeromobili rilevano la propria posizione. Viene usato il sistema GNSS (Global Navigation Satellite System), il quale comprende tutti i sistemi di navigazione satellitare che utilizzano costellazioni di satelliti per fornire dati di posizionamento, tra i quali troviamo ad esempio GPS, GALILEO, GLONASS;
- L'apparato ADS-B di bordo, attraverso il quale i piloti riescono a visualizzare le informazioni ricevute tramite il CDTI (Cockpit Display Traffic Indicator) in modo da rilevare le proprie posizioni e vedere anche quelle degli aeromobili operanti nella stessa area;
- I ricevitori ADS-B di terra, attraverso i quali gli enti ATC possono visualizzare gli aeromobili e tutti i dati trasmessi dall'ADS-B di bordo.

I parametri come la posizione, la velocità e l'identificazione dell'aeromobile, sono trasmessi tramite il Transponder Modo S Extended Squitter a una frequenza di 1090 MHz.

Un messaggio ADS-B è lungo 112 bit e assume la struttura riportata in figura 2.6.

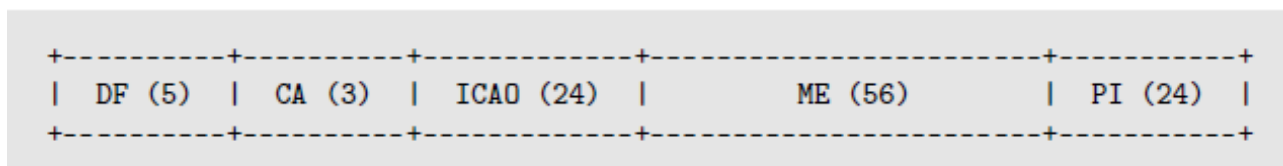


Fig. 2.6 Composizione di un messaggio ADS-B

Nello specifico, un messaggio ADS-B di un aeromobile civile inizia con un Downlink Format pari a 17, che equivale a 10001 in codice binario, dunque 5 bit. I bit da 6 a 8 descrivono la capacità del Transponder, successivamente troviamo i 24 bit che rappresentano l'indirizzo ICAO univoco che caratterizza l'aeromobile. Infine troviamo i 56 bit dal 33 all'88 che contengono il messaggio ADS-B, seguiti dai 24 bit di Parity Information che chiudono il contenuto [13].

Tab. 2.2 Struttura del messaggio ADS-B per numero di bit

Bit	No. bits	Abbreviation	Information
1 – 5	5	DF	Downlink Format
6 – 8	3	CA	Transponder capability
9 – 32	24	ICAO	ICAO aircraft address
33 – 88 (33 – 37)	56 (5)	ME (TC)	Message, extended squitter (Type code)
89 - 112	24	PI	Parity / Interrogator ID

Tab. 2.3 ADS-B Type Code e relativo contenuto

Type Code	Data frame content
1 – 14	Aircraft identification
5 – 8	Surface position
9 – 18	Airborne position (w/Baro Altitude)
19	Airborne velocities
20 – 22	Airborne position (w/GNSS Height)
23 – 27	Reserved
28	Aircraft status
29	Target state and status information
31	Aircraft operation status

Per identificare quale informazione è contenuta nel messaggio ADS-B, bisogna valutare il Type Code, collocato tra i bit 33 e 37. In tabella 2.3 è descritta la relazione tra ciascun Type Code e l'informazione ad esso associata contenuta nel segmento ME [13].

I diversi messaggi ADS-B hanno diverse frequenze di trasmissione. La frequenza di aggiornamento varia anch'essa a seconda se l'aeromobile si trovi a terra o in volo, o se l'aeromobile sia fermo o si sta muovendo quando si trova a terra. La tabella 2.4 indica le varie frequenze di trasmissione dei messaggi ADS-B [13].

Tab. 2.4 Frequenze di trasmissione dei messaggi ADS-B

Messages	TC	Ground (still)	Ground (moving)	Airborne
Aircraft identification	1 – 4	0.1 Hz	0.2 Hz	0.2 Hz
Surface position	5 – 8	0.2 Hz	2 Hz	-
Airborne position	9 – 18, 20 – 22	-	-	2 Hz
Airborne velocity	19	-	-	2 Hz
Aircraft status	28	0.2 Hz (no TCAS RA and Squawk Code change)		
		1.25 Hz (change in TCAS RA or Squawk Code)		
Target states and status	29	-	-	0.8 Hz
Operational status	31	0.2 Hz	0.4 Hz (no NIC/NAC/SIL change)	
			1.25 Hz (change in NIC/NAC/SIL)	

Ricapitolando dunque, il sistema di sorveglianza ADS-B presenta numerosi vantaggi, tra cui [9] :

- **Assoluta precisione**, che consente di ridurre le separazioni tra gli aeromobili e la possibilità per i piloti di poter mantenere costantemente una determinata distanza da altri aeromobili;
- **Ampliata copertura della sorveglianza in rotta**, coprendo aree dove il controllo radar tradizionale non arriva;
- **Sorveglianza a bassissime quote**, in quanto non è ostacolato dall'orografia del suolo;
- **Sorveglianza al suolo sugli aeroporti**, è efficiente in qualsiasi condizione meteorologica;
- **Costi di installazione e gestione**, risultando dieci volte inferiori a quelli dei sistemi radar.

Tuttavia, esistono anche alcuni svantaggi, i principali:

- **Saturazione del segnale**, in caso di situazioni ad alto traffico dove diversi aeromobili trasmettono contemporaneamente messaggi sulla stessa frequenza. In questo caso alcuni messaggi ADS-B potrebbero andare persi;
- **Security**, un qualsiasi dispositivo dotato di antenna ricevente ADS-B può ricevere i dati provenienti dagli aeromobili, anche all'esterno degli enti adibiti alla sorveglianza, compromettendo così la sicurezza delle informazioni rilevate.
- **Spoofing**, ovvero la generazione di dati falsi relativi, ad esempio, ad aerei nelle vicinanze o anche ad aerei che in realtà non esistono, causata molto spesso da attacchi hacker informatici con l'intenzione di creare confusione nel controllo del traffico aereo.

3 Extended Reality (XR)

In questo capitolo verranno presentati i temi relativi all'Extended Reality e più nello specifico alla Realtà Aumentata, in modo da rendere più chiaro il funzionamento della piattaforma discussa in questa tesi.

L'Extended Reality (XR) è un concetto che fa riferimento a tutte le tecnologie combinanti ambienti reali con ambienti virtuali, le quali implementano interazioni uomo-macchina tramite computer, monitor o dispositivi indossabili, ad esempio, visori o occhiali [14].

La XR è un concetto definito in modo piuttosto ampio, al quale si fa spesso riferimento come “cross-reality” [15]. Possiamo definire l'XR come un termine ombrello, dove la “X” rappresenta una variabile per qualsiasi tecnologia di calcolo spaziale o futura [16].

La XR consente l'interazione tra oggetti reali e virtuali che reagiscono a stimoli di tipo fisico o che vengono ancorati a oggetti del mondo reale. I sistemi XR utilizzano telecamere con sensori di profondità o altri tipi di sensori per creare una mappa tridimensionale dell'ambiente, permettendo agli oggetti virtuali di interagire in modo accurato con le superfici e gli oggetti del mondo reale.

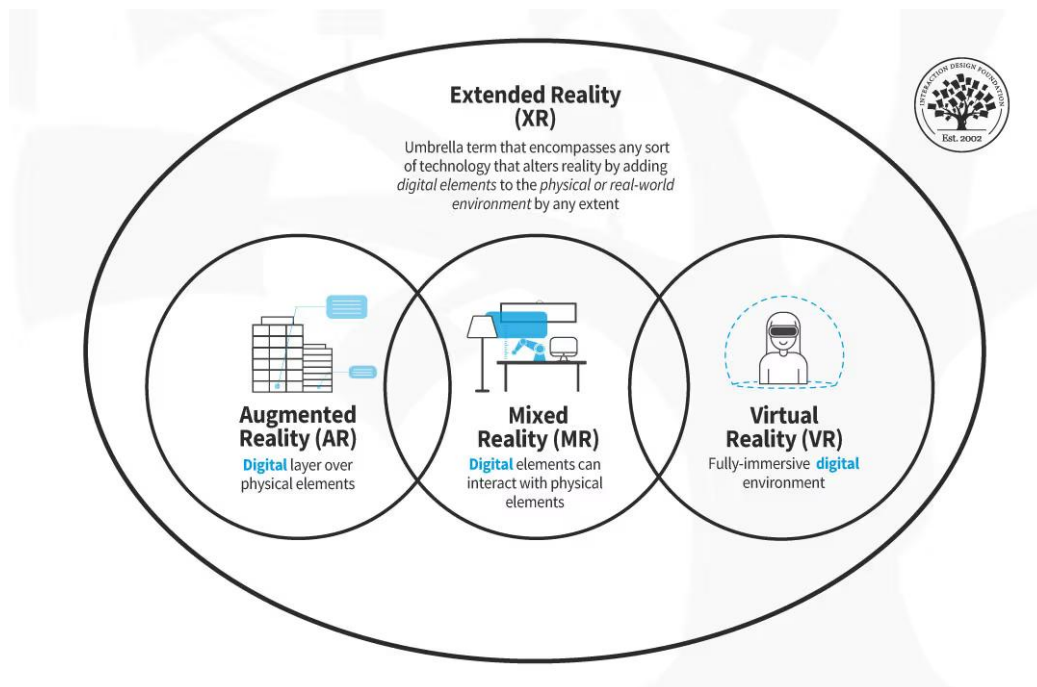


Fig. 3.1 Descrizione del termine XR e principali differenze tra AR, MR e VR [17]

Possono essere inoltre impiegate tecnologie ottiche avanzate per visualizzare oggetti virtuali, come gli ologrammi, i quali possono essere visualizzati da diverse prospettive [18].

All'interno della XR troviamo i concetti di "Realtà Virtuale", in inglese Virtual Reality (VR), di "Realtà Aumentata", in inglese Augmented Reality (AR) e di "Realtà Mista", in inglese Mixed Reality (MR).

Essi nel dettaglio fanno riferimento a:

- **Realtà Virtuale (VR)**, la quale incorpora ambienti interattivi e altamente vividi generati al computer, che permettono all'utente di raggiungere uno stato di totale immersione nell'ambiente virtuale, facilitando al contempo interazioni umane che sono multisensoriali, dinamiche e che riproducono la percezione e la comprensione che l'utente ha del mondo reale sfruttando maggiormente i sensi della vista e dell'udito, oltre che utilizzando i più recenti sensori tattili [16].

Esistono diversi sistemi immersivi utilizzabili dall'utente, la tecnologia che sta diventando più comune, tuttavia, è il visore immersivo VR. Quando esso viene indossato, l'utente non ha alcun modo di vedere la realtà fisica che lo circonda, ma vede solamente l'ambiente virtuale fornito dal visore [19]. Il visore fornisce all'utente un'esperienza completamente immersiva creando un ambiente simulato. Esso include display integrati, sensori per il rilevamento del movimento e dispositivi di output audio. Il visore traccia i movimenti della testa e del corpo dell'utente, consentendo interazioni in tempo reale con il mondo virtuale. Inoltre, vengono utilizzati controller portatili o altri dispositivi di input per interagire con gli oggetti all'interno dell'ambiente virtuale [18].



Fig. 3.2 Visore VR

- **Realtà Aumentata (AR)**, nella quale gli elementi digitali generati sono solitamente associati agli elementi fisici del mondo reale che circondano l'utente [19]. Gli elementi virtuali, sovrapposti a quelli reali, possono essere visualizzati dall'utente tramite particolari dispositivi ottici quali visori o occhiali AR, ma anche semplicemente tramite l'uso di uno smartphone, tablet o PC dotato di webcam, dove a schermo le grafiche virtuali saranno sovrainposte a immagini e video del mondo reale. Il concetto di AR verrà meglio approfondito nella sezione 3.1.



Fig. 3.3 Esempio di interfaccia AR ottenuta tramite smartphone

- **Realtà Mista (MR)**, nella quale l'utente vede la realtà fisica che lo circonda, e in essa sono integrate visualizzazioni tridimensionali virtuali [19]. Dunque, la MR unisce elementi reali ad elementi virtuali, i quali interagiscono dinamicamente fra di loro, unificando le due idee di VR e di AR. L'idea alla base della MR è creare oggetti virtuali che permettano agli utenti di interagire con l'ambiente tridimensionale sia quando sono immersi in un mondo virtuale con la VR, sia quando si hanno contenuti virtuali sovrapposti a quelli reali con la AR. In alcune situazioni la MR viene implementata come una soluzione che può essere convertita sia in AR che in VR con un unico dispositivo, combinando vantaggi e svantaggi di entrambe le realtà [18].

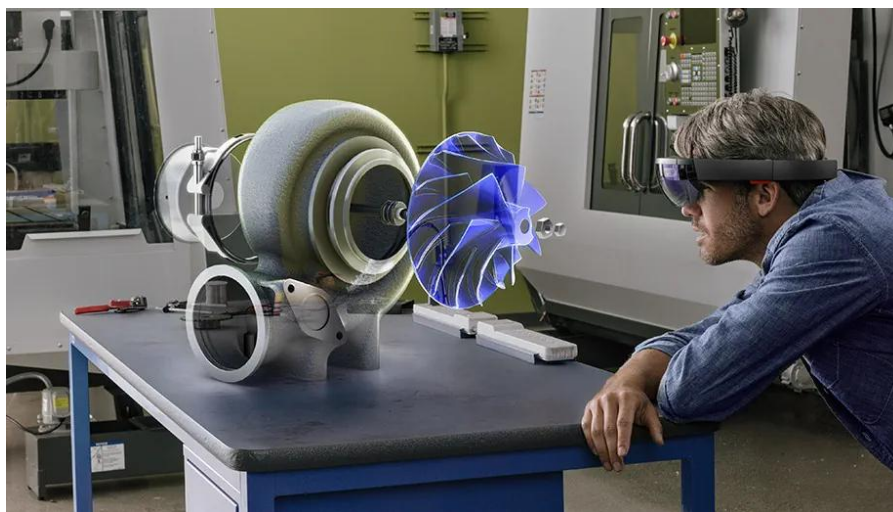


Fig. 3.4 Interfaccia di Realtà Mista

3.1 La realtà aumentata (AR)

La Realtà Aumentata (AR) aumenta la percezione dell'utente sul mondo reale sovrapponendo contenuti virtuali all'ambiente reale circostante. Questa esperienza può essere fruita, come detto in precedenza, tramite occhiali intelligenti (*smart glasses*), smartphone, tablet o speciali visori AR.

I dispositivi AR utilizzano sensori quali fotocamere, GPS e sensori di profondità per posizionare accuratamente i contenuti virtuali rispetto all'ambiente reale dell'utente, che verranno visualizzati tramite display. Con la Realtà Aumentata, un ambiente del mondo reale può essere migliorato o sostituito con un ambiente di un mondo virtuale o simulato, utilizzando una tecnologia di realtà come, ad esempio, uno smartphone con un'applicazione AR.

I software e le applicazioni di Realtà Aumentata più diffuse funzionano in modo fluido sui dispositivi mobili. Queste aiutano gli utenti ad accedere ad un mondo digitale in Realtà Aumentata facilmente in pochi e semplici passaggi, tutto ciò che bisogna fare è attivare le fotocamere sui propri smartphone, guardare l'ambiente circostante attraverso lo schermo del telefono e affidarsi all'applicazione o al software di Realtà Aumentata per migliorare l'esperienza e avere il controllo della configurazione digitale [18].

Le sovrapposizioni (*overlays*) digitali agli elementi reali, vengono utilizzate in diversi ambiti e per diversi scopi.

Tra i più diffusi troviamo:

- La presenza di etichette, denominate “labels”, che possono contenere informazioni riguardanti l’oggetto reale al quale sono applicate, o più semplicemente anche una descrizione di esso;
- Sovrapposizione di immagini digitali, modelli 3D e altri dati;
- Istruzioni fornite all’utente in tempo reale, per esempio nelle applicazioni di navigazione;
- Cambiamenti di tonalità in base alle variazioni ambientali;
- Utilizzo di filtri da applicare alle foto all’interno delle applicazioni social media, quali ad esempio Instagram, Snapchat o altre, al fine di alterare l’aspetto o l’ambiente circostante dell’utente;
- Elementi digitali applicabili anche in condizioni di Realtà Mista.

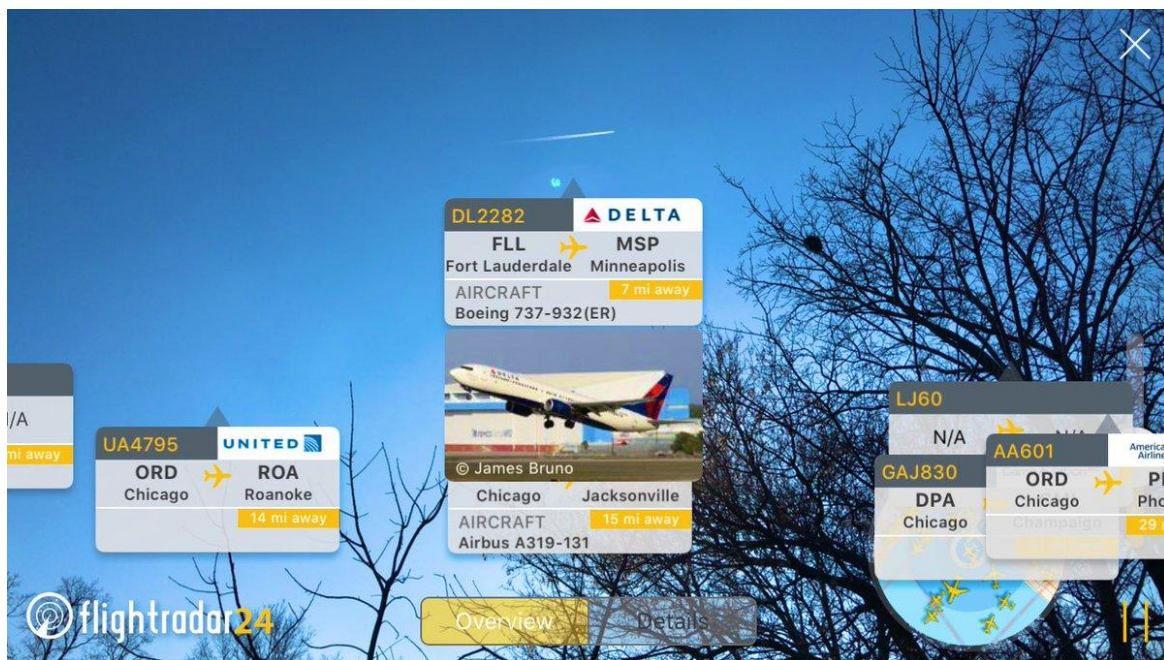


Fig. 3.5 Interfaccia di Realtà Aumentata nell'applicazione FlightRadar24

La Realtà Aumentata al giorno d’oggi trova spazio in ogni settore lavorativo, per lo scopo di questa tesi verrà descritto nel dettaglio il suo utilizzo e la sua implementazione presso una Torre di Controllo di aeroporto (Sezione 4.2).

4 La Realtà Aumentata nel controllo del traffico aereo

In questo capitolo verranno presentati i progetti di ricerca che hanno coinvolto l'Università di Bologna riguardo all'implementazione della Realtà Aumentata presso una Torre di Controllo aeroportuale.

I progetti, RETINA e DTT, sono stati entrambi finanziati dal progetto europeo SESAR, un programma che ha l'obiettivo di innovare lo spazio aereo europeo e il suo sistema di gestione del traffico aereo, per adeguarlo alle attuali e future richieste del settore, in termini di sicurezza (safety e security), efficienza, capacità, sostenibilità, etc.

Si descriverà inoltre nello specifico il tema dell'implementazione dell'AR in uno scenario reale e le relative limitazioni.

4.1 SESAR (Single European Sky ATM Research)

SESAR (Single European Sky ATM Research) è un progetto incluso all'interno dell'iniziativa dell'Unione Europea "Single European Sky" (SES), in italiano "Cielo Unico Europeo", ed è la chiave per l'attuazione della Strategia di Mobilità Intelligente e Sostenibile della Commissione Europea, definendo e sviluppando tecnologie per trasformare la gestione del traffico aereo (ATM) in Europa. Le attività di ricerca del progetto SESAR vengono attualmente gestite e coordinate da SESAR 3 Joint Undertaking (SESAR 3 JU), una partnership istituzionale pubblico-privata sviluppata successivamente alla conclusione dei precedenti programmi di innovazione SESAR 1 e SESAR 2020. SESAR 3 JU è stata istituita per accelerare tramite la ricerca e l'innovazione la realizzazione della trasformazione digitale dell'ATM con un progetto da essa istituito e denominato "Digital European Sky" (Cielo Europeo Digitale). Per ottenere ciò, SESAR 3 JU sta sfruttando, accelerando e sviluppando l'adozione delle soluzioni tecnologiche più all'avanguardia per gestire aeromobili convenzionali, droni, aerotaxi e altri velivoli, che volano ad altitudini più elevate [20].

L'obiettivo del Digital European Sky è dunque quello di modernizzare la gestione del traffico aereo in Europa per renderla più efficiente, sostenibile, sicura e integrata. Esso sfrutta le più recenti

tecnologie digitali per aumentare i livelli di automazione, la condivisione di dati cyber-sicura e la connettività nella gestione del traffico aereo, oltre a consentire la virtualizzazione della sua infrastruttura e l'erogazione dei servizi di traffico aereo in tutte le tipologie di spazio aereo, incluse le operazioni di volo a bassissima e ad alta quota. Queste tecnologie permetteranno dunque di ottenere un sistema agile incline a far fronte alle esigenze e ai cambiamenti nella domanda di traffico aereo e alla diversità dei velivoli [21].

All'interno degli obiettivi del Cielo Unico Europeo, rientra anche lo sviluppo e l'implementazione dei piani tecnologici presenti nello European ATM Master Plan, ovvero il piano istituito da Eurocontrol per la modernizzazione dell'ATM in Europa con l'obiettivo di far diventare lo spazio aereo europeo il più efficiente e ambientalmente sostenibile nel quale volare entro il 2045. I punti principali da implementare secondo il piano sono riassunti dal SESAR Master Plan 2025 e sono elencati di seguito [22] :

- **Trajectory – based operations**, operazioni attraverso le quali i piani di volo arricchiti di dati permetteranno agli aeromobili di navigare con grande precisione lungo rotte efficienti dal punto di vista del consumo di carburante, aiutati anche dall'operato dell'ATM.
- **Maggior volume di dati fra le comunicazioni aria–terra e terra–terra**, dove l'uso di *machine learning*, intelligenza artificiale e calcolatori di grandi quantità di dati permetterà all'ATM di operare in modo più intelligente e sicuro.
- **Livelli più elevati di automazione tra la cabina di pilotaggio e assistenza a terra**, dove la voce non sarà più il mezzo di comunicazione primario poiché le applicazioni *machine-to-machine* gestiranno la maggior parte delle attività di routine.
- **Collaborazione uomo–macchina**, attraverso questo processo i controllori del traffico aereo, personale tecnico di sicurezza elettronica del traffico aereo, equipaggio di volo e operatori faranno squadra con le macchine per fornire la massima qualità del servizio.
- **Spazio aereo dinamico**, ciò consentirà la configurazione dello spazio aereo quasi in tempo reale e il sistema sarà completamente automatizzato per determinate fasi di volo.

All'interno di SESAR si sono svolti i due progetti sul concetto di Realtà Aumentata in Torre di Controllo RETINA e DTT, partecipati dal gruppo di ricerca in “Tecnologie digitali e metodi di progetto per applicazioni aerospaziali” dell'Università di Bologna.

4.2 Implementazione della Realtà Aumentata in Torre di Controllo

Il controllore del traffico aereo supervisiona gli aeromobili presenti sull'area di manovra aeroportuale e i voli in arrivo e in partenza controllandoli a vista dalla torre, tramite la cosiddetta *out-of-the-window view* (OTW), e fornendo ad essi le clearance e le separazioni necessarie. L'ambiente di lavoro è considerato ad alto rischio, è richiesta un'elevata concentrazione e il rispetto delle tempistiche è cruciale. Ciò nonostante, il controllore deve mantenere il flusso del traffico aereo ordinato e scorrevole, nonché deve assicurare la completa sicurezza delle operazioni aeroportuali, con il risultato finale però di un elevato e pesante carico di lavoro sotto il quale operare.

Dal momento che avere elevate performance è d'obbligo in uno scenario in cui il traffico aereo mondiale è in continua crescita, nel corso degli anni le Torri di Controllo sono state equipaggiate con sempre più monitor, computer e interfacce digitali che forniscono sempre più informazioni necessarie al controllore del traffico aereo nel monitorare costantemente la situazione e prendere le decisioni in piena sicurezza, ma come effetto collaterale si è ottenuto un aumento del carico di lavoro cognitivo. Il controllore è difatti costretto a cambiare e alternare continuamente l'attenzione e la propria visuale da fuori dalle finestre di torre (posizione *Head-up*) ai monitor e alle interfacce presenti all'interno della torre, spesso sulla scrivania di lavoro, per fornire informazioni di traffico ed esercitare la sorveglianza sugli aeromobili (posizione *Head-down*).

In questo scenario, la Realtà Aumentata (AR) è utile per aiutare il controllore nell'evitare questo continuo spostamento dell'attenzione, trasferendo la maggior parte delle informazioni di sorveglianza dalle interfacce consultabili in posizione *Head-down* a una corrispondente visualizzazione all'esterno delle finestre di torre, aumentando il tempo passato in posizione *Head-up* in una vista OTW, e riducendo il numero di volte in cui si deve spostare lo sguardo [3].

4.2.1 Progetto RETINA

Il progetto RETINA (Resilient Synthetic Vision for Advanced Control Tower Air Navigation Service Provision), è uno dei progetti selezionati e finanziati da SESAR focalizzati sulle operazioni aeroportuali ad alte prestazioni che hanno approfondito il potenziale e l'applicabilità delle tecnologie di Realtà Aumentata / Virtuale per la fornitura del servizio di Controllo del Traffico Aereo da parte della Torre di Controllo aeroportuale. Il progetto ha valutato se i concetti alla base di strumenti quali gli *Head-Mounted Displays* (HMD), gli *Enhanced Vision Systems* (EVS) e i *Synthetic*

Vision Systems (SVS), già usati nei cockpit, potessero essere trasferiti all'ente ATC con uno sforzo relativamente ridotto e apportando benefici per la Consapevolezza Situazionale (SA) dei controllori. Sono stati studiati due differenti sistemi di Realtà Aumentata, ovvero i *Conformal Head-Up Displays* (C-HUD) i quali coincidono con le finestre della torre; e i *See-Through Head-Mounted Displays* (ST-HMD). È stato concepito anche un terzo strumento dissimile, ovvero un'interfaccia di Realtà Virtuale *Table-Top*, dal momento che la vista dall'alto è il modo più semplice per visualizzare il modello digitale dell'aeroporto [23].

L'ambiente di Realtà Aumentata (AR) ideato deve essere in ogni momento consapevole della posizione degli occhi dell'utente rispetto agli schermi di Realtà Virtuale / Aumentata. Questo è obbligatorio per generare il contenuto AR ottimale per ciascun occhio e raggiungere la migliore sovrapposizione delle immagini possibile.

Nell'ambito del progetto RETINA, questo concetto è stato implementato e dimostrato utilizzando sensori non intrusivi di tracciamento corporeo disponibili in commercio o sfruttando le capacità di tracciamento di certi HMD. In questo modo, gli schermi AR sapranno dove si trova il controllore e dove sta guardando, consentendo all'interfaccia di presentare le informazioni più utili senza aggiungere inutile ingombro. Segnali che indicano situazioni critiche che avvengono al di fuori del campo visivo del controllore possono anche essere posizionati nella sua visione periferica, per attirare l'attenzione in quella direzione.



Fig. 4.1 Controllore del Traffico Aereo con HMD e relativa interfaccia visualizzabile

Nel complesso, le informazioni che sono visualizzabili sugli schermi dei computer di bordo (*Head-down position*) quali dati di volo, configurazione della pista, avvisi di intrusione possono essere visualizzate sia sugli occhiali *see-through* sia sugli *head-up displays*, venendo quindi sovrapposte alla vista del controllore [23].

Come database comune tra i sistemi VR/AR, è stato sviluppato e implementato un modello tridimensionale dell'ATZ, con scenari in tempo reale eseguiti all'interno di un ambiente di simulazione CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*), fornendo un posizionamento preciso per oggetti aerei e terrestri simulati.

Altre informazioni che possono essere visualizzate per il controllore includono dati relativi al SWIM (*System Wide Information Management*), come condizioni meteorologiche, direzione e velocità del vento, *wind shear* (gradiente di vento) e visualizzazione dei vortici di scia [23].

All'interno del progetto sono state effettuate delle validazioni *Human In The Loop* (HITL), ovvero con dei controllori di volo professionisti, i quali hanno testato l'interfaccia AR all'interno di un ambiente di simulazione *full scale* in tempo reale, dunque utilizzando una vista realistica dalla torre di controllo con degli scenari di traffico aereo verosimili gestiti dai controllori, scegliendo come ambiente di riferimento l'aeroporto di Bologna. Iniziare lo sviluppo di un'interfaccia in un ambiente simulato propone del resto numerosi vantaggi in termini di libertà di controllo sullo scenario desiderato, scegliendo fra diverse condizioni meteorologiche, mole di traffico aereo, eventuali situazioni di emergenza; oltre che garantire benefici in termini economici.

La scelta di un approccio *human-centered* negli scenari di validazione proposti, ovvero avere riscontri maturati da esperienze dirette da parte degli utenti, è spesso ottimale in progetti orientati a sviluppare una particolare interfaccia in questo caso AR, quali appunto RETINA e i progetti che sono seguiti ad esso, ad esempio DTT (sezione 4.2.2) o l'implementazione dei relativi risultati nel mondo reale (sezione 4.3).

In conclusione, a seguito delle validazioni, è stato preferito come visore di supporto l'*Head-Mounted display* HoloLens, dal momento che ha consentito di personalizzare dati e punti di vista per il singolo utente senza presentare problemi di parallasse e di allineamento delle sovrapposizioni digitali alla vista esterna per più punti di vista. Sono stati inoltre verificati i vantaggi in termini di consapevolezza situazionale e di carico di lavoro per i controllori di volo.

Il progetto RETINA è tra i vincitori del Digital European Sky Awards 2021, i premi assegnati ai migliori risultati di ricerca e alle migliori innovazioni in Europa nel campo della gestione del traffico aereo, promossi dalla SESAR Joint Undertaking (SJU) [24].

I risultati ottenuti in RETINA hanno infine fornito una solida base di partenza per lo sviluppo del progetto DTT.

4.2.2 Progetto DTT (Digital Technologies for Towers)

Il progetto DTT (Digital Technologies for Towers) è stato finanziato dall'UE mediante SESAR ed è stato istituito nel programma SESAR 2020. Questo è un progetto più ampio che ha coinvolto diversi enti europei impegnati nello studio della gestione del traffico aereo, partito dai buoni risultati ottenuti con RETINA. Esso ha principalmente riguardato la digitalizzazione delle torri di controllo aeroportuali.

In particolare in questa tesi viene descritto il lavoro svolto da DTT sulla soluzione 97.1 proposta, riguardante l'applicazione della Realtà Virtuale e Aumentata a una Torre di Controllo aeroportuale e la sua relativa validazione [25]. Un focus particolare viene poi fatto sull'esercizio numero 2 di questa soluzione, del quale si è occupato il gruppo di ricerca in "Tecnologie digitali e metodi di progetto per applicazioni aerospaziali" dell'Università di Bologna.

La Soluzione 97.1 ha sviluppato e validato nuove modalità di Interfaccia Uomo-Macchina (HMI) con relative tecnologie in diverse torri di controllo aeroportuali. A tale scopo, i partner di progetto hanno pianificato tre diversi esercizi su tre piattaforme distinte di simulazione e validazione, valutando l'uso di etichette di tracciamento (*tracking labels*), interazione multimodale, guida all'attenzione (*attention guidance*) e *air gestures*, ovvero movimenti effettuati con le mani nello spazio intorno all'utente per interagire tramite l'interfaccia AR con i sistemi di sorveglianza.

Questi tre esercizi di validazione sono [25]:

- **Validazione delle modalità di interazione AR per la Torre di Schiphol con focus sulla guida all'attenzione.**

Quest'esercizio è stato basato su una simulazione in tempo reale che ha affrontato l'uso dell'acquisizione e guida dell'attenzione (*Attention Capturing and Guidance – AC&G*) come nuova modalità di interazione per i controllori in un ambiente personalizzato corrispondente alla Torre di Controllo dell'aeroporto di Amsterdam Schiphol.

Sono stati utilizzati dispositivi AR (Microsoft HoloLens 2) per esporre i controllori a informazioni di allerta visive e acustiche e a diverse simbologie, e implementati diversi scenari di validazione, definiti per l'area di movimento dell'aeroporto con diversi volumi di traffico, includendo vari tipi di allerta con differenti livelli di severità.

Si è osservato un aumento della Consapevolezza Situazionale (SA), dell'efficacia operativa e una riduzione del carico di lavoro.

- **Interazione Multimodale con Realtà Aumentata nella Torre di Controllo.**

Quest'esercizio è stato basato su una simulazione in tempo reale che ha affrontato l'inserimento della Realtà Virtuale / Aumentata in torre di controllo implementando concetti quali le etichette di tracciamento dei velivoli (*label*), l'interazione tramite *air gestures* e i sistemi di sicurezza e di guida all'attenzione presso l'aeroporto di Bologna, con l'obiettivo di aumentare il grado di maturità tecnologica della sperimentazione effettuata in RETINA.

Questa attività si è concentrata in particolare sull'HMI (Interfaccia Uomo-Macchina) personalizzata in base alle diverse postazioni di lavoro dei controllori GND (Ground) e RWY (Runway), implementando dunque un modello di interazione multimodale.

L'esercizio di validazione predisposto per le due diverse postazioni operative di controllo ha previsto l'utilizzo di un sistema di *safety nets* e del visore HMD HoloLens 2. Inoltre, i controllori sono stati abilitati a comunicare con il sistema attraverso una combinazione di voce e gesti, con la possibilità in particolare per il controllore GND di impartire autorizzazioni non critiche in termini di tempo (*not-time-critical clearances*) interagendo direttamente con le etichette di tracciamento VR/AR tramite *air gestures*. Infine, gli avvisi di sicurezza relativi a incursioni in pista sono stati visualizzati grazie a *overlays* e allarmi direzionali.

I risultati delle validazioni di un'interazione multimodale con Realtà Aumentata in torre hanno evidenziato principalmente un aumento della consapevolezza situazionale e dell'efficienza dei controllori, insieme a una riduzione del carico di lavoro e una migliorata HMI e usabilità del sistema.



Fig. 4.2 Laboratorio di Realtà Virtuale e di Simulazione dell'Università di Bologna

- **Realtà Aumentata nell'ambiente della Torre in modalità *shadow mode*.**

Quest'esercizio di validazione è stato l'unico fra i tre ad essersi tenuto in *shadow mode* (osservazione) al fine di valutare la Realtà Aumentata, le etichette di tracciamento e gli *air gestures*, presso l'aeroporto di Vitoria-Gasteiz, un aeroporto di piccole dimensioni privo di radar di superficie. L'obiettivo principale è dimostrare che un'interfaccia AR *Head-up* possa supportare il controllore nella visualizzazione esterna (OTW, *Out-The-Window*) fornendo informazioni significative e riducendo di conseguenza i cambi di sguardo tra la visuale esterna e la postazione operativa di controllo (CWP, *Controller Working Position*). Questo supporto migliora la consapevolezza situazionale soprattutto in condizioni di scarsa visibilità.

4.3 Sviluppo della Realtà Aumentata nel mondo reale

In seguito ai progressi ottenuti dall'AR in Torre di Controllo in specifici ambienti simulati grazie alle iniziative dei progetti RETINA e DTT, l'Università di Bologna si è occupata di trasferire i risultati ottenuti dalle simulazioni all'interno del mondo reale, mantenendo come scenario di riferimento la torre di controllo dell'aeroporto di Bologna "Guglielmo Marconi".

Per implementare i concetti sviluppati nel mondo reale, si è inizialmente partiti dal design dell'interfaccia validato e rifinito in RETINA e DTT, utilizzando un sistema di informazioni di sorveglianza elaborate in tempo reale. La scelta è stata quella di utilizzare un metodo di progettazione centrata sull'utente, detta *User-Centred Design* (UCD), il cui processo è iterativo e tiene conto dei diversi *feedback* ottenuti dai controllori che hanno partecipato alla validazione del progetto nonché dei progetti passati.

Nell'implementazione e validazione dell'AR nel mondo reale vi sono una serie di requisiti da soddisfare, i quali sono [3] :

- Acquisizione accurata della posizione di un aeromobile in tempo reale;
- Tracciamento accurato in tempo reale dell'aeromobile tramite un'etichetta in AR;
- Gestione di più aeromobili contemporaneamente;
- Proiezione degli ologrammi di tracciamento minimizzando la latenza;
- Valutazione di possibili sorgenti di errore e correzione delle stesse;
- Verifica dell'affidabilità e della precisione del sistema di tracciamento;

- Implementazione di nuove interfacce relative alla sorveglianza degli aeromobili;
- Validazione della piattaforma.

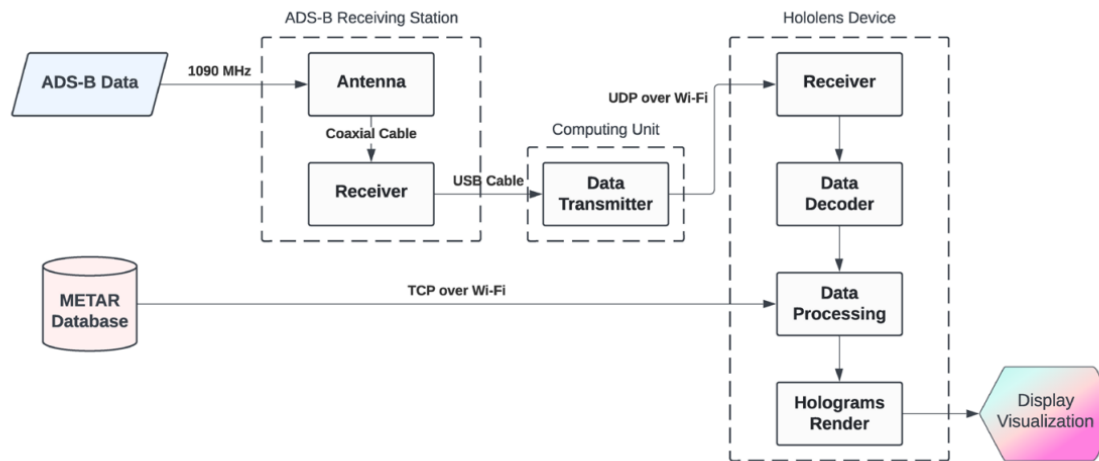


Fig. 4.3 Architettura della piattaforma AR implementata nel mondo reale [3]

Per soddisfare questi requisiti, si è deciso di utilizzare un ricevitore ADS-B per acquisire il vettore di stato dell'aeromobile dai dati ADS-B mandati da esso in tempo reale. Questi dati vengono letti da un PC e vengono trasmessi a un dispositivo HoloLens 2 (Sezione 6.1.2) usando un UDP (*User Datagram Protocol*). L'applicazione AR del dispositivo HoloLens processa i dati, identifica la posizione dell'aeromobile e rappresenta a video le *tracking labels* (etichette).

Per ottenere ciò bisogna considerare che la Realtà Aumentata utilizza dei sistemi di riferimento attorno all'utente, dunque locali, mentre le posizioni degli aeromobili provenienti dai dati ADS-B sono espresse in coordinate globali (geodetiche). Per questo motivo è dunque necessaria una procedura di calibrazione affinché avvenga l'allineamento delle label agli aeromobili e il loro tracciamento. Le applicazioni AR di HoloLens 2 fissano innanzitutto la posizione di un sistema di riferimento virtuale all'interno di una stanza, in secondo luogo interviene una procedura sviluppata per identificare la posizione e l'orientamento globale di questo sistema di riferimento virtuale usato da HoloLens. Infine, viene convertita la posizione relativa dell'aeromobile rispetto a tale sistema in coordinate cartesiane, utilizzando un algoritmo di conversione da coordinate geodetiche a un sistema East-North-Up (ENU) centrato con l'origine del sistema di riferimento virtuale [3].

La posizione viene poi corretta da errori di altitudine in modo da ottenere una corrispondenza esatta dei dati con gli ologrammi. In particolare, l'informazione relativa all'altitudine fornita dall'ADS-B corrisponde all'altitudine barometrica QNE, ovvero rispetto all'isobara di pressione standard di

1013,25 hPa. Essa viene dunque riportata tramite dei calcoli all'altezza rispetto al terreno (QFE), usando la pressione che vi è all'aeroporto al momento (QNH). In più il dato finale viene modificato di un termine correttivo che tiene conto dell'altezza del carrello sul quale poggia l'aeromobile e di alcuni errori di misura, in maniera tale che la label si trovi sempre sopra l'aereo, senza coprirlo. Infine, i dati di sorveglianza vengono rappresentati sulle label che seguono in tempo reale l'aeromobile. Esse contengono diverse informazioni fondamentali dell'aeromobile quali l'altezza rispetto a terra (QFE), la velocità, la prua, il nominativo, la distanza dall'utente o da un qualunque altro punto che si voglia selezionare, e la velocità verticale. Le label sono disposte a una distanza focale costante rispetto all'utente, e indicano la posizione dell'aeromobile con una linea culminante con un puntino, mentre i dati sono inclusi all'interno di un riquadro, il cui colore è diverso a seconda se l'aeromobile rappresenta un traffico in arrivo o in partenza [3].

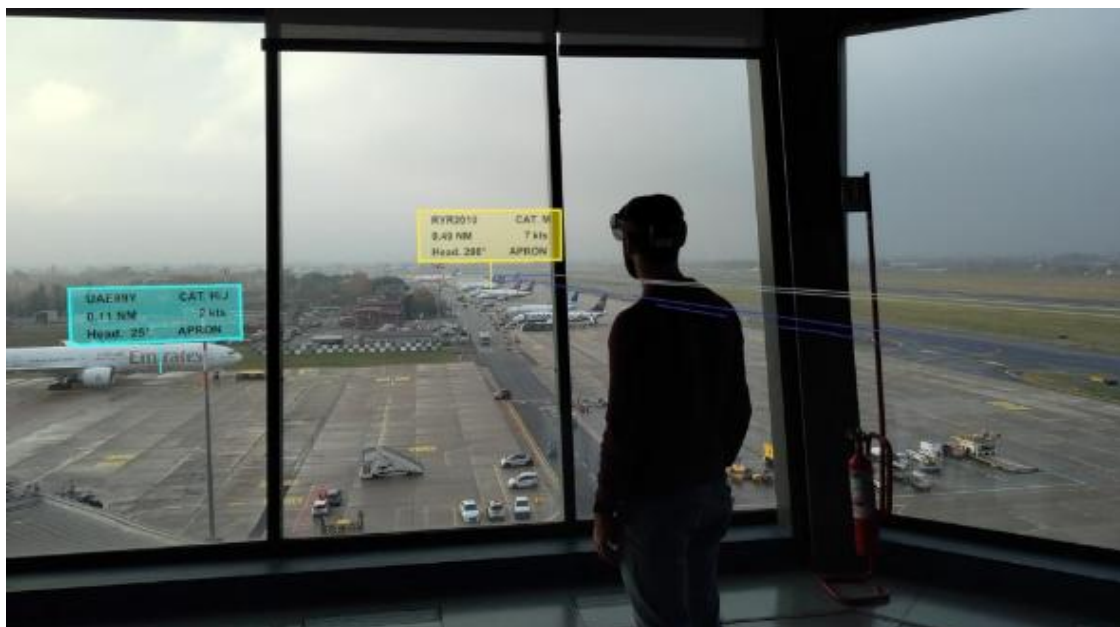


Fig. 4.4 Visualizzazione delle label relative agli aeromobili tramite dispositivo HoloLens 2

Le label, quindi, verranno gestite in tempo reale dalla piattaforma, il vettore di stato che verrà ricevuto dai dati ADS-B dell'aereo andrà ad aggiornare ciclicamente i dati presenti nella label nonché la sua posizione nel tempo in modo che essa segua idealmente l'aeromobile. I dati verranno visualizzati dal controllore di volo che indossa il dispositivo HoloLens 2 [3].

L'intera piattaforma è stata sviluppata sulla piattaforma di Unity3D, venendo programmata con Visual Studio in codice C#.

4.3.1 Limitazioni dell'applicazione dell'AR al mondo reale

Alla luce di quanto esposto finora, si è visto che la piattaforma implementata nel mondo reale presso una Torre di Controllo aeroportuale ha introdotto numerosi vantaggi in termini di comodità, sicurezza e *situational awareness* dei controllori del traffico aereo.

Tuttavia, permangono alcune limitazioni, le quali subentrano nel momento in cui la piattaforma si trova a interfacciarsi con uno scenario reale.

La principale è relativa alla frequenza di aggiornamento dei messaggi ADS-B. Come visto nella sezione 2.3.1, gli aeromobili trasmettono i dati ADS-B a tutte le stazioni riceventi di terra con una certa frequenza, che può variare in base al tipo di messaggio trasmesso. Si ha come risultato dunque che l'aggiornamento delle informazioni relative a un aeromobile, e di conseguenza l'aggiornamento dei dati visualizzati sulle label dai controllori, non è continuo con il moto dell'aeromobile ma discreto, a seconda della frequenza con la quale si riceve il messaggio ADS-B. Avere un aggiornamento dei dati e quindi anche di posizione dell'aeromobile e della relativa label a determinati intervalli di tempo, si traduce nella visualizzazione a video in un andamento non fluido e "a scatti" della label, la quale spesso non segue perfettamente l'aeromobile ma tende a rimanere indietro fino alla ricezione del successivo aggiornamento ADS-B che la porta a cambiare nuovamente posizione tentando di riavvicinarsi al relativo aeromobile.



Fig. 4.5 Ritardo nel posizionamento della label rispetto alla posizione del relativo aeromobile

Questo problema è amplificato da eventuali errori nella determinazione della posizione GPS dell'aeromobile, a buchi di segnale dovuti a interferenze o *jamming* della frequenza ADS-B, alla

copertura non ottimale dell'antenna in alcuni settori dell'ATZ, in particolare a terra, che uniti a un fisiologico ritardo nella catena di ricezione, decodifica e rielaborazione dei messaggi, porta ad un degradamento della qualità del segnale ADS-B e ad ampi intervalli temporali in cui la posizione non viene aggiornata.

Poiché in varie situazioni, il movimento non fluido della label o il suo eccessivo discostamento rispetto alla posizione reale dell'aereo sono problematici per il controllore di volo, l'obiettivo di questo lavoro di tesi ha riguardato esattamente la risoluzione di queste problematiche, come sarà mostrato in dettaglio nei capitoli 5 e 6.

5 Metodi di tracciamento e predizione della traiettoria degli aeromobili in area aeroportuale

Come visto nel capitolo precedente, nel mondo reale si ottiene un funzionamento corretto della piattaforma ma con alcune limitazioni relative allo spostamento non sempre ottimale delle label.

Per questo motivo, dunque, in questa tesi si è deciso di intervenire per isolare questo tipo di limitazione e risolverla in modo da ottenere un andamento della label più preciso e continuo, cosicché il controllore che usa il sistema possa ottenere la massima fruibilità della piattaforma senza che si presentino limitazioni intrinseche.

Per ottenere ciò si è fatto ricorso all'implementazione nella piattaforma per la Torre di Controllo di metodologie di tracciamento e di predizione della traiettoria degli aeromobili in area aeroportuale, con l'idea di passare quindi a un movimento della label non più legato solamente alla frequenza di aggiornamento dei messaggi ADS-B, ma predetto continuamente nel tempo sulla base degli ultimi messaggi ADS-B ricevuti e aggiornato con l'arrivo del messaggio successivo.

Esistono diversi metodi matematici che governano questo tipo di situazione, i principali sono il metodo Map Matching, e l'utilizzo di un filtro di Kalman.

All'interno di questo capitolo si vedrà nel dettaglio una descrizione teorica di entrambi i metodi e delle motivazioni che hanno portato alla scelta e alla conseguente implementazione del filtro di Kalman per il caso proposto in questa tesi.

5.1 Metodo Map Matching

Il primo metodo è il cosiddetto metodo Map Matching, il quale lega la posizione dell'aereo e dunque della relativa label in un percorso ben preciso.

Il metodo prende in input i punti noti sulla mappa aeroportuale forniti dall'ente ATC presso i quali deve transitare l'aeromobile in fase di rullaggio, e crea unendoli un percorso continuo che seguirà presumibilmente il velivolo, centrato nella mezzeria delle piste e vie di rullaggio, il quale costituirà la mappatura dell'aeroporto. Questo percorso creato nella mappatura sarà composto da un elevato

numero di segmenti, i quali collegano i nodi, ovvero i punti notevoli della mappa aeroportuale dove tipicamente vi sono intersezioni tra vie di rullaggio o piste, cambi di direzione o curve.

Il metodo inizialmente prende in input la posizione dell'aeromobile dal suo messaggio ADS-B, dopodiché viene identificato un gruppo di segmenti della mappa aeroportuale nelle vicinanze del velivolo entro una certa soglia che sono candidati a essere il segmento esatto sul quale si trova al momento l'aeromobile. Tra tutti i segmenti candidati il metodo sceglie il migliore, ovvero quello sul quale è più probabile che si trovi l'aeromobile; dunque, l'algoritmo farà risultare la posizione dell'aeromobile, e conseguentemente della sua relativa label, su quel segmento [26].

Per rilevare il miglior segmento corrispondente, viene calcolato il punteggio di corrispondenza (*matching score*) per ciascuno dei segmenti candidati nelle vicinanze della posizione GPS dell'aeromobile. Il *matching score* g_{AB} del generico segmento candidato AB rispetto al punto P di posizione dell'aeromobile si calcola come:

$$g_{AB}(P) = w_d d_{AB}(P) + w_\theta \theta_{AB}(P) \quad (1)$$

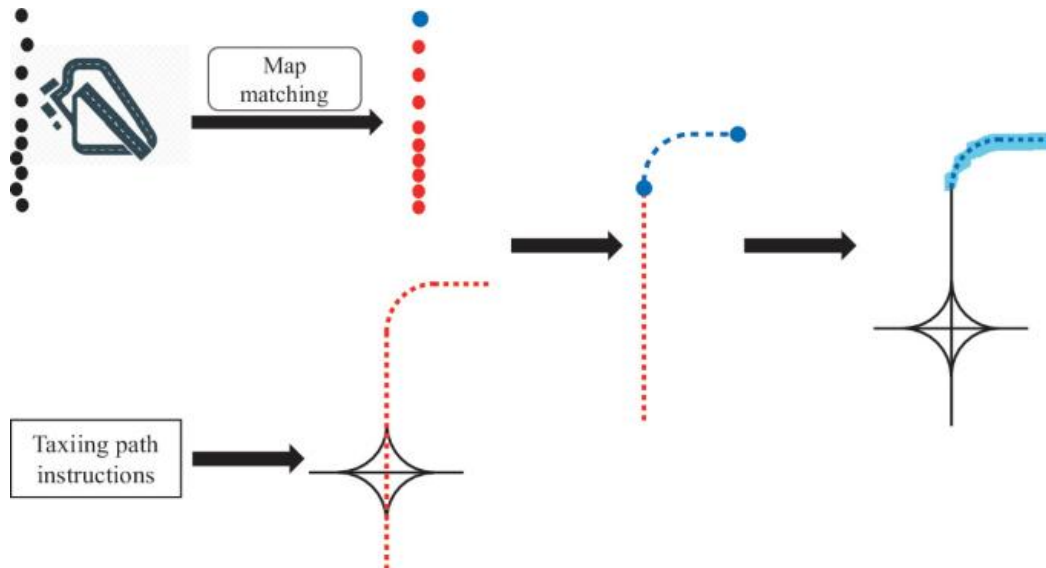
dove $d_{AB}(P)$ è la distanza più corta tra il punto P e il segmento AB ; $\theta_{AB}(P)$ è l'angolo di intersezione compreso tra 0 e 90 gradi tra la linea retta sulla quale giace la prua dell'aeromobile al punto P e il segmento AB ; w_d e w_θ sono i pesi rispettivamente della distanza e della direzione, tipicamente definiti come costanti empiriche a causa della mancanza di dati GPS quali l'errore sull'accuratezza orizzontale di posizione che rendono impossibile stabilire un modello dinamico per la determinazione del valore dei pesi [26].

Per ciascun punto dell'aeromobile, il segmento candidato per il quale risulta il minor valore di *matching score* è selezionato come il miglior segmento corrispondente, e il punto presente sul segmento scelto che risulta più vicino al punto di posizione dell'aereo viene scelto come il punto in cui l'aeromobile verrà mappato e di conseguenza sarà il punto dove apparirà la relativa label.

Si itera questa procedura per ciascuna posizione sulla superficie aeroportuale che l'aeromobile occuperà nel suo percorso, ottenendo così come risultato una traiettoria standard sulla quale verrà visualizzato il movimento dell'aereo e della relativa label [26].

Una volta che l'aeromobile è stato agganciato al relativo segmento, si ha un miglioramento della predizione della traiettoria, dal momento che l'algoritmo sa su quale segmento si trova l'aeromobile e sono già noti quali saranno i segmenti successivi in caso di traiettoria rettilinea, o i possibili segmenti successivi in caso di vicinanza a un'intersezione. In questo modo il sistema di predizione del movimento futuro, dunque, utilizza la geometria della mappa aeroportuale, riuscendo a predire

in maniera ottimale anche la fase di curva nonostante essa tenda a risultare più critica a causa della non linearità del movimento, grazie al fatto che tramite la mappatura si possiede a priori un riferimento geometrico.



**Fig. 5.1 Esempio di tracciamento della traiettoria di taxi di un velivolo
secondo il metodo del Map Matching**

Il metodo del Map Matching, largamente utilizzato all'interno delle applicazioni di navigazione satellitare per veicoli, non è stato scelto all'interno della piattaforma discussa in questa tesi a causa della sua minore flessibilità a cambiamenti di traiettoria del velivolo al di fuori di quella preventivamente mappata nel metodo. Infatti, in caso di deviazione dell'aeromobile per una determinata motivazione (ad esempio a un'intersezione tra le vie di rullaggio o a causa di un incidente), essa non viene correttamente rilevata dall'algoritmo che cerca sempre di riportare la posizione predetta sul percorso prestabilito, vincolandola ad esso.

5.2 Filtro di Kalman, struttura e funzionamento

Il filtro di Kalman predice lo stato che è più probabile che abbia un sistema, nel caso di questa tesi l'aeromobile, utilizzando un modello cinematico o dinamico di quest'ultimo, e migliora la qualità della predizione nei successivi aggiornamenti basandosi sugli ultimi dati di misurazione ottenuti e

sui valori di rumore di processo e misurazione inizialmente impostati tramite una specifica fase di tuning [27].

Il filtro di Kalman parte da uno stato iniziale corrispondente alla prima misurazione ottenuta delle variabili di un particolare sistema, oppure da un'inizializzazione preimpostata di esso. Da lì il filtro inizierà la sua fase di predizione dello stato tra un aggiornamento dei dati di misurazione del sistema e il successivo. Quando arriverà il nuovo aggiornamento di misurazione, il filtro prenderà in input i nuovi dati aggiornati e correggerà lo stato rispetto all'ultimo che era stato predetto con più o meno vigore a seconda dei valori dei rumori di misurazione e di processo, i quali indicano quanta fiducia il filtro deve avere nella predizione piuttosto che nella nuova misurazione.

Verrà esposta di seguito una descrizione generale della struttura di un filtro di Kalman bidimensionale e lineare applicato a un generico sistema, e dei passaggi logici da esso eseguiti.

Innanzitutto si definisce lo stato di un sistema che in questo caso si considera essere composto per semplicità da quattro generiche variabili x, y, z, u . Si otterrà quindi un vettore di stato corrispondente a $\vec{X} = [x, y, z, u]$, e definiamo P la relativa matrice di covarianza [28].

La matrice P di covarianza sarà una matrice quadrata simmetrica, in questo caso di dimensione 4×4 , che serve a quantificare quanto le attuali stime di ciascuna variabile di stato e le correlazioni fra esse siano affidabili o meno. Gli elementi sulla diagonale $P_{i,i}$ rappresentano le varianze della singola variabile di stato x_i , mentre gli elementi fuori dalla diagonale $P_{i,j}$ rappresentano le covarianze delle diverse variabili di stato x_i e x_j . Valori di P alti indicano un'alta incertezza e dunque una bassa fiducia nella stima delle variabili, mentre al contrario valori di P bassi indicano una bassa incertezza e dunque un'alta fiducia.

La varianza misura quanto i valori di una singola variabile si discostano dal suo valore medio, o atteso. Considerando una generica variabile X si può definire la varianza come:

$$Var(X) = E[X^2] - (E[X])^2 \quad (2)$$

Dove $Var(X)$ è la varianza della variabile X ed $E[]$ è l'operatore del valore atteso.

La covarianza misura come due variabili variano congiuntamente, indica dunque se all'aumentare di una tenda ad aumentare anche l'altra (covarianza positiva), o viceversa se al diminuire di una tenda a diminuire anche l'altra (covarianza negativa). Considerando due variabili generiche X e Y si può definire la covarianza come:

$$Cov(X, Y) = E[XY] - E[X]E[Y] \quad (3)$$

Si indicizzano i vettori di stato nel tempo con l'indice k , considerando che l'indice $k + 1$ sarà separato da k da un tempo Δt . Il generico vettore di stato del sistema all'istante $k + 1$, che sarà definito come $\vec{X}^+ = [x_{k+1}, y_{k+1}, z_{k+1}, u_{k+1}]$, si calolerà come:

$$\vec{X}^+ = F \cdot \vec{X} + \vec{w} \quad (4)$$

Dove F è una matrice 4x4 chiamata matrice di transizione di stato, la quale lega lo stato all'istante di tempo attuale $\vec{X}_k$ con lo stato all'istante di tempo precedente $\vec{X}_{k-1}$. Il generico elemento $F_{i,j}$ indica come l' i -esima variabile di stato è influenzata dalla j -esima nel tempo Δt .

Mentre $\vec{w}$ è un vettore chiamato rumore di processo, definito come:

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_4 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Dove w_i è il rumore applicato alla i -esima variabile di stato.

Si può definire la matrice di rumore di processo Q , calcolabile come:

$$Q = E[\vec{w} \cdot \vec{w}^t] \quad (6)$$

Con $E[]$ valore atteso.

La matrice Q quantifica l'incertezza che il modello matematico introduce quando predice lo stato futuro del sistema. Se è alta allora significa che la previsione del filtro è poco affidabile e che dunque ci si aspetta un rapido aumento della covarianza P . Al contrario se Q è bassa significa che la previsione del filtro è affidabile e dunque la covarianza P non aumenterà in modo significativo. Chiamando $\hat{\vec{X}}$ lo stato stimato e $\hat{P}$ la covarianza dello stato stimato all'istante di tempo k , lo stato e la relativa matrice di covarianza predetti al passaggio successivo saranno dati da:

$$\widehat{\vec{X}^+} = F \cdot \hat{\vec{X}} \quad (7)$$

$$\widehat{P^+} = F \cdot \hat{P} \cdot F^T + Q \quad (8)$$

Quando verrà ricevuto un nuovo messaggio di aggiornamento, il nuovo vettore di misurazione che possiamo denotare come $\vec{X}^m = [x^m, y^m, z^m, u^m]$ verrà preso in input dal filtro, il quale lo userà per calcolare il vettore di innovazione $\vec{v}$, che sarà la differenza tra $\vec{X}^m$ e il vettore composto dalle variabili predette nell'ultimo istante di tempo:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} x^m - \widehat{x^+} \\ y^m - \widehat{y^+} \\ z^m - \widehat{z^+} \\ u^m - \widehat{u^+} \end{pmatrix} \quad (9)$$

La matrice di covarianza R associata al vettore di misurazione, è chiamata matrice di rumore di misurazione e avrà dimensione 4×4 . Essa quantifica l'incertezza, o l'errore, che è intrinseco nei dati ricevuti. Se R è alta significa che i dati appena ricevuti sono rumorosi e dunque poco affidabili, per cui bisogna dare più peso alla predizione basata sul modello, quindi dare più peso alla matrice di rumore di processo Q . Al contrario se R è bassa significa che i dati appena ricevuti sono piuttosto affidabili e dunque viene dato più peso alla misurazione, correggendo in maniera più vigorosa lo stato stimato dal modello di predizione.

Considerando le variabili e i loro relativi errori indipendenti da loro, nella matrice R rimarranno solo i termini nella diagonale principale che saranno le varianze di ciascuna variabile.

Infine, si può definire la matrice di osservazione H che ha genericamente dimensioni $m \times n$, dove m è la dimensione delle misure e n è la dimensione dello stato, in questo caso sarà una matrice 4×4 .

Il generico elemento $H_{i,j}$ della matrice indica quanto l' i -esima variabile di stato contribuisce alla j -esima variabile di misurazione. Se la variabile di stato è misurata direttamente, allora il valore del relativo elemento di H sarà 1, e il resto della riga 0, riducendo la matrice a una matrice identità.

Si possono ora calcolare le ultime equazioni che compongono il filtro di Kalman, definendo S la matrice delle covarianze del vettore di innovazione v , I la matrice identità 4×4 , e K il guadagno di Kalman, il quale è una matrice 4×4 che determina il bilanciamento tra la predizione dello stato e la misurazione effettuata dal sensore.

Si può dunque infine trovare il nuovo stato stimato $\hat{X}$ e la nuova covarianza stimata $\hat{P}$ quando si ha una nuova misura:

$$S = H \cdot P \cdot H^T + R \quad (10)$$

$$K = P \cdot H^T \cdot S^{-1} \quad (11)$$

$$\widehat{X^+} = \widehat{X^+} + K \cdot \vec{v} \quad (12)$$

$$\hat{P} = (I - K \cdot H) \cdot \widehat{P^+} \cdot (I - K \cdot H)^T + K \cdot R \cdot K^T \quad (13)$$

Il guadagno di Kalman K è in sostanza un fattore di peso ottimale che minimizza l'errore di stima. Si nota dalla (11) che quando R è molto piccolo il guadagno K è alto, per cui il filtro dà molto peso alla nuova misurazione ignorando in gran parte la predizione del modello. Viceversa se R è molto

grande allora K tenderà a zero; dunque, il filtro ignora la misurazione e si fida quasi esclusivamente della predizione fatta dal modello.

Calcolati i nuovi valori di $\hat{X}$ e di $\hat{P}$ con la (12) e la (13), essi verranno sostituiti nella (7) e nella (8), ricominciando da capo l'iter con le varie predizioni delle variabili, finché non arriverà un nuovo messaggio che il filtro userà per aggiornare i parametri.

5.2.1 Filtro di Kalman Esteso (EKF)

Il filtro visto in sezione 5.2 è un filtro di Kalman standard lineare. In caso però di sistemi governati anche da parti di dinamica non lineare, è necessaria l'implementazione dell'filtro di Kalman Esteso, in inglese Extended Kalman Filter (EKF). Il filtro EKF opera linearizzando le non linearità del sistema intorno allo stato stimato corrente, utilizzando la Jacobiana della funzione di transizione di stato, nel caso precedente la matrice F . L'implementazione dell'EKF non implica un incremento della qualità del risultato rispetto a un modello lineare [28], bensì è necessaria per tutti quei sistemi più complessi, ad esempio quello discusso in questa tesi, che possiedono delle non linearità. Infatti, la posizione di un aeromobile in rullaggio al suolo a causa della sua velocità angolare durante le traiettorie curvilinee è aggiornata da un'equazione che contiene funzioni non lineari come le funzioni trigonometriche relative all'angolo di prua e al rateo di virata.

I passaggi logici che determinano la struttura del filtro sono analoghi a quelli visti per il filtro di Kalman standard nella sezione 5.2, con la differenza però che la matrice di transizione di stato F e la matrice di osservazione o misurazione H non sono più costanti, ma sono matrici Jacobiane che linearizzano le rispettive funzioni f e h le quali non sono più lineari. La funzione di transizione di stato non lineare $f(x)$ con x variabile generale sarà una funzione che descrive la predizione dello stato, mentre la funzione di osservazione o misurazione non lineare $h(x)$ con x variabile generale sarà una funzione che proietta lo stato predetto nello spazio della misura.

Mantenendo sempre per semplicità un esempio di un sistema generico con 4 variabili di stato e di misurazione, la matrice di transizione di stato F calcolata al tempo k diventa:

$$F_k = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{\hat{X}^+_{k-1}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{pmatrix} \Big|_{\hat{X}^+_{k-1}} \quad (14)$$

Viene valutata in $\hat{X}^+_{k-1}$, ovvero il precedente stato stimato già corretto al tempo $k - 1$.

La matrice di osservazione o misurazione H calcolata al tempo k diventa:

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\hat{X}_k} = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_4}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_4}{\partial x_4} \end{pmatrix} \Big|_{\hat{X}_k} \quad (15)$$

Viene valutata in $\hat{X}_k$, ovvero l'ultima stima dello stato che si ha prima di applicare la correzione al tempo k .

Si applicherà dunque la (14) all'interno della (7) e della (8), e la (15) all'interno della (10), della (11) e della (13). La struttura del filtro rimarrà per il resto inalterata.

5.2.2 Filtro di Kalman Unscented (UKF)

L'Unscented Kalman Filter (UKF) è un'alternativa all'EKF per stimare lo stato di sistemi dinamici non lineari. La sua differenza fondamentale sta nel modo in cui gestisce la propagazione della covarianza, ovvero dell'incertezza, attraverso le funzioni non lineari f e h .

L'UKF appartiene a una classe di filtri più grande chiamata *Sigma-Point Kalman Filter*, o *Linear Regression Kalman Filter*, che usa una tecnica di linearizzazione statistica.

In sostanza, mentre l'EKF si basa sulla linearizzazione tramite Jacobiane, l'UKF si basa sulla cosiddetta trasformazione *Unscented*, dove invece di approssimare la funzione non lineare f o h , viene approssimata la distribuzione di probabilità dello stato in modo non lineare. Ciò viene effettuato utilizzando un insieme deterministico di punti campionati chiamati *Sigma Points* per catturare con precisione la vera media e covarianza della distribuzione, prima che questa venga trasformata dalla funzione non lineare. Vengono generati un numero di *Sigma Points* almeno pari a $2n + 1$ con n dimensione dello stato, scelti deterministicamente per avere esattamente la media e la covarianza della distribuzione Gaussiana originale. Ciascuno di questi punti viene poi fatto evolvere individualmente attraverso la funzione non lineare completa f o h senza l'utilizzo di derivate o Jacobiane. Infine i nuovi punti propagati vengono ricombinati usando dei pesi predefiniti per calcolare la nuova media e la nuova covarianza, utilizzate all'interno dell'iterazione successiva [29]. Il risultato del filtro UKF è la fornitura di una stima della media e della covarianza molto più accurata dell'EKF, arrivando fino al secondo ordine di Taylor per la media e al terzo ordine per la covarianza contro il primo ordine al quale si ferma l'EKF, riducendo il rischio che la matrice P sottostimi l'incertezza reale del sistema.

L'UKF è dunque uno dei sistemi di filtraggio non lineare più robusti in ingegneria, e viene perciò utilizzato all'interno di progetti che richiedono un'accuratezza estrema nelle manovre non lineari.

5.3 Scelta e struttura del filtro di Kalman per il problema di tracciamento e predizione

Nello scegliere il metodo di tracciamento e predizione della traiettoria dei velivoli da implementare nella piattaforma Unity in Realtà Aumentata descritta in questa tesi, è stato preferito l'utilizzo di un filtro di Kalman a discapito del metodo del Map Matching, il quale risulta prestarsi meno a questo tipo di scenario per i motivi descritti in conclusione della sezione 5.1.

Per il problema in esame si è scelto di implementare un modello di Kalman a due filtri, in particolare un filtro orizzontale e un filtro verticale. Usare due filtri di Kalman separati fra loro fa sì che ciascun filtro sia ottimizzato per il suo specifico campo di azione, in questo modo l'aeromobile verrà tracciato in modo accurato sia durante le fasi di taxi a terra che durante le fasi di decollo e atterraggio.

Questa particolare distinzione deriva dalle ipotesi semplificative che è possibile adottare per il tracciamento dei velivoli all'interno dell'ATZ. A terra, l'aeromobile si muove solo nel piano orizzontale, dunque le traiettorie giaceranno in uno spazio bidimensionale e saranno indipendenti dalla dinamica del velivolo. In aria, invece, la traiettoria dei velivoli all'interno dell'ATZ comprende solo la parte finale dell'atterraggio e quella iniziale di salita, le quali sono essenzialmente rettilinee. Dunque è possibile non considerare virate quando il velivolo è in aria, e di conseguenza essa si riduce a un moto in un singolo piano verticale di tipo rettilineo uniforme lungo l'asse verticale.

Il vantaggio inoltre è che i due filtri utilizzano ciascuno variabili indipendenti dall'altro, dunque non sono fra loro collegati, semplificando lo scenario.

Separando i due comportamenti si ottiene quindi un filtro bidimensionale che sarà quello orizzontale il quale governa le variabili di stato lungo gli assi x e y , e un filtro verticale che sarà monodimensionale e che governa le variabili di stato lungo il solo asse z . Questa situazione semplifica notevolmente la struttura dell'algoritmo, evitando di utilizzare un unico filtro tridimensionale nel quale la complessità del calcolo aumenterebbe notevolmente.

Vedremo nel dettaglio nelle sezioni di seguito 5.3.1 e 5.3.2 le scelte relative alla struttura dei due filtri.

5.3.1 Filtro orizzontale EKF con modello Constant Turn Rate and Velocity (CTRV)

Per governare l'aeromobile sul piano orizzontale, quando esso è situato sulla superficie aeroportuale, è stato utilizzato un filtro di Kalman EKF sulla base di un modello Constant Turn Rate

and Velocity (CTRV). Questo modello assume che la velocità dell'aeromobile v e la sua velocità angolare o rateo di virata $\dot{\psi}$ siano costanti nell'intervallo di tempo Δt presente fra due previsioni successive del filtro. Questo intervallo di tempo corrisponde su Unity a quello del metodo Update, ovvero all'aggiornamento nella simulazione di ogni singolo frame, che tipicamente varia tra le 30 e le 60 volte al secondo. La velocità e il tasso di virata, seppur non costanti in un aeromobile, possono essere approssimabili come tali in un intervallo di tempo così piccolo, questa assunzione permetterà così di derivare le equazioni all'interno della matrice di transizione F del filtro, riuscendo dunque a implementare la Jacobiana che governa il filtro EKF, dal momento che il sistema presenta una non linearità all'interno delle equazioni di propagazione della posizione.

Le accelerazioni e decelerazioni longitudinali e angolari dell'aeromobile, nel modello CTRV vengono contenute all'interno della matrice del rumore di processo Q . Se prendiamo in esame l'esempio di un aumento di velocità e dunque di un'accelerazione dell'aeromobile, la misurazione che arriva dai dati ADS-B, il cui vettore è indicato con Z , avrà come componente della velocità un valore più elevato rispetto a quello della predizione del filtro. Questa differenza tra i due valori, che rappresenta l'innovazione v , verrà moltiplicata per il guadagno di Kalman K come visto in sezione 5.2, e di conseguenza utilizzata per correggere lo stato dell'aeromobile X al suo nuovo valore con un peso legato ai valori delle matrici di rumore di processo e di rumore di misurazione Q e R .

Nel caso implementato, il vettore di stato X dell'aeromobile all'istante di tempo k sarà composto da 5 variabili e sarà pari a:

$$\vec{X}_k = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ v \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (16)$$

Essendo in un sistema di riferimento ENU (East-North-Up), la posizione p_x corrisponde alla longitudine, la posizione p_y alla latitudine, v è la velocità dell'aeromobile in metri al secondo, ψ il suo angolo di prua in radianti, $\dot{\psi}$ la sua velocità angolare in radianti al secondo.

Lo stato successivo dell'aeromobile all'istante $k + 1$, sarà calcolato mediante le funzioni f di transizione non lineari.

Si possono dividere i casi in base al valore della velocità angolare, in particolare quando l'aeromobile è in traiettoria rettilinea e quindi ha una velocità angolare quasi zero, il vettore di stato all'istante successivo diventa:

$$\vec{X}_{k+1} = f(\vec{X}_k) = \begin{pmatrix} p_x + v\Delta t \cos(\psi) \\ p_y + v\Delta t \sin(\psi) \\ v \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (17)$$

Mentre quando si ha una velocità angolare diversa da zero, in traiettoria curvilinea, il vettore di stato all'istante successivo diventa:

$$\vec{X}_{k+1} = f(\vec{X}_k) = \begin{pmatrix} p_x + \frac{v}{\dot{\psi}}(\sin(\psi + \dot{\psi}\Delta t) - \sin(\psi)) \\ p_y + \frac{v}{\dot{\psi}}(-\cos(\psi + \dot{\psi}\Delta t) + \cos(\psi)) \\ v \\ \psi + \dot{\psi}\Delta t \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (18)$$

Il vettore di misurazione all'istante di tempo k contenente i dati ADS-B dell'aeromobile sarà un vettore di 4 componenti:

$$\vec{Z}_k = \begin{pmatrix} p_{x,adsb} \\ p_{y,adsb} \\ v_{adsb} \\ \psi_{adsb} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Dove la posizione $p_{x,adsb}$ sarà la longitudine contenuta nel messaggio ADS-B, la posizione $p_{y,adsb}$ la latitudine, la v_{adsb} la velocità in nodi e la ψ_{adsb} l'angolo di prua in gradi.

Siccome il filtro opera nel Sistema Internazionale, questi dati nell'implementazione del filtro vengono trasformati nelle relative unità di misura, dunque la velocità da nodi a metri al secondo e l'angolo di prua da gradi a radianti.

La matrice di osservazione H sarà una matrice che mappa il vettore di stato dell'aeromobile nel vettore di misurazione, quindi è una 4x5 così composta:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Definite le varie componenti, l'algoritmo del filtro EKF viene implementato come descritto nelle sezioni 5.2 e 5.2.1, dunque calcolando la Jacobiana della funzione di transizione di stato f a seconda della casistica di velocità angolare in cui si rientra e utilizzandola per calcolare la matrice delle covarianze P all'interno dello step di previsione. Infine viene calcolato il valore del guadagno di Kalman K in modo da utilizzarlo per ricavare i nuovi valori aggiornati del vettore di stato $\vec{X}$ dell'aeromobile e della relativa matrice delle covarianze P .

5.3.2 Filtro verticale standard con modello Constant Acceleration (CA)

Per il movimento dell'aeromobile lungo il piano verticale invece, si è optato per l'implementazione di un filtro di Kalman lineare standard, con modello ad accelerazione costante (CA). In questo caso il filtro è meno complesso rispetto a quello che governa il movimento sul piano orizzontale; infatti, lungo il piano verticale per quel che concerne il traffico aereo aeroportuale gli aeromobili normalmente non eseguiranno virate o spostamenti laterali rilevanti, ma saranno solo in fase di salita o di discesa lungo una traiettoria sostanzialmente rettilinea (appartenente a un piano verticale contenente l'asse pista).

In questo caso si assume che l'accelerazione verticale dell'aeromobile nell'intervallo di tempo Δt sia costante, e qualsiasi variazione di essa sarà considerata un rumore di processo.

Nel caso implementato, il vettore di stato dell'aeromobile all'istante di tempo k governato da questo filtro avrà 3 componenti, le quali saranno:

$$\vec{X}_{z,k} \begin{pmatrix} p_z \\ v_z \\ a_z \end{pmatrix} \quad (21)$$

Dove p_z è l'altitudine dell'aeromobile in metri rispetto alla superficie aeroportuale, v_z è la velocità verticale in metri al secondo e a_z è l'accelerazione verticale.

Lo stato predetto all'istante di tempo successivo $k + 1$ si calcola tramite la funzione di transizione di stato f , e diventa:

$$\vec{X}_{z,k+1} = f(\vec{X}_{z,k}) = \begin{pmatrix} p_z + v_z \Delta t + \frac{1}{2} a_z \Delta t^2 \\ v_z + a_z \Delta t \\ a_z \end{pmatrix} \quad (22)$$

Dove la matrice di transizione F è pari a:

$$F_z = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & \frac{1}{2} \Delta t^2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Il vettore di misurazione che contiene i dati provenienti dall'ADS-B all'istante di tempo k , avrà 2 componenti, le quali saranno:

$$\vec{Z}_{z,k} \begin{pmatrix} p_{z,adsb} \\ v_{z,adsb} \end{pmatrix} \quad (24)$$

Dove $p_{z,adsb}$ è l'altitudine dell'aeromobile rispetto alla superficie aeroportuale in piedi e $v_{z,adsb}$ è la velocità verticale in piedi al secondo.

Anche in questo caso verranno convertite nelle unità di misura del Sistema Internazionale con le quali lavora il filtro, dunque rispettivamente in metri e in metri al secondo.

Infine la matrice di osservazione H che mappa il vettore dello stato verticale predetto dell'aeromobile con il vettore di misurazione ADS-B, sarà una matrice 2x3 del tipo:

$$H_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

In questo caso l'algoritmo segue i passaggi algebrici esposti nella sezione 5.2, predicendo il vettore di stato $\hat{X}$ e la matrice delle covarianze P dell'aeromobile nell'istante di tempo successivo. Viene infine calcolato il guadagno di Kalman K utilizzato per aggiornare il vettore di stato X e la matrice delle covarianze P .

5.4 Tuning dei parametri

Per regolare e ottimizzare un filtro di Kalman rispetto all'applicazione per cui se ne fa uso, viene effettuato il tuning. Il tuning consiste nell'impostare i valori delle matrici di covarianza del rumore di processo e del rumore di misurazione Q e R , nel caso in esame si è considerata un'indipendenza degli errori fra le diverse variabili; quindi, il tuning va ad essere implementato sui valori delle diagonali principali delle matrici di covarianza del rumore, risultando gli elementi fuori dalle diagonali a valore 0.

Il tuning deve essere effettuato in modo tale da bilanciare la fiducia tra il modello di previsione e la misurazione del sensore ADS-B. Si deve quindi fare in modo di minimizzare l'errore quadratico medio valutando se il filtro di Kalman deve fidarsi maggiormente della sua previsione matematica oppure del dato che riceve dal sensore. I parametri che controllano questo bilanciamento sono le diagonali principali delle matrici Q e R , di conseguenza verrà calcolato il guadagno di Kalman K in base al rapporto tra Q e R per determinare il peso da assegnare alla correzione dello stato.

La matrice di covarianza del rumore di processo Q definisce quanto ci si aspetta che il modello di movimento sia errato o soggetto a variazioni non modellate tra un passo di tempo e l'altro.

Impostando valori di Q alti si intende che la previsione non è affidabile, la matrice di covarianza di stato P cresce rapidamente e il filtro è spinto ad accettare correzioni sempre più ampie dal sensore.

Si avrà dunque un tracciamento molto reattivo ma instabile, che può causare *overshooting* o divergenza dalla traiettoria vera.

Se si impostano invece valori di Q bassi, si intende che il modello di previsione è molto preciso, dunque il filtro tenderà a correggere di meno lo stato del sistema con quello misurato dal sensore, di conseguenza si otterrà un tracciamento più liscio ma sarà meno reattivo e più soggetto a lag, essendo più lento nel rispondere alle correzioni del sensore.

La matrice di covarianza del rumore di misurazione R invece, definisce quanto ci si aspetta che il dato grezzo ADS-B sia impreciso o soggetto a rumore, descrivendo dunque l'incertezza del rumore riflettendo la varianza dei dati di misurazione.

Impostando valori alti di R si ottiene un guadagno di Kalman K piccolo, diminuendo l'impatto della misura sulla stima dello stato. Con alti R infatti si ha che il filtro interpreta la misura come rumorosa, di conseguenza tende ad ignorare i messaggi ADS-B risultando molto liscio, ma più soggetto a lag di posizione.

Viceversa impostando valori di R bassi si intende che la misura è molto precisa, per cui il filtro si fida molto dei suoi dati ADS-B e tende a seguirli non appena arriva una nuova misurazione, risultando quindi molto reattivo ma di conseguenza più soggetto a scatti causati dal rumore intrinseco del sensore.

L'implementazione del filtro di Kalman scelto per lo scenario discusso in questa tesi, con la relativa ottimizzazione del tuning, verrà descritta nel capitolo 6.

6 Implementazione del Filtro di Kalman e risultati ottenuti

In questo capitolo verranno esposti gli strumenti utilizzati nello sviluppo di questo progetto di tesi. Verrà inoltre presentato il metodo di implementazione del filtro di Kalman all'interno della piattaforma Unity per la gestione del tracciamento e predizione della traiettoria dei velivoli in area aeroportuale. Si descriverà in particolare come il filtro è stato strutturato all'interno del programma, i metodi utilizzati per migliorare la qualità del tracciamento come il tuning dei parametri e, infine, i risultati ottenuti.

6.1 Strumenti utilizzati

I principali strumenti utilizzati all'interno del progetto di tesi per lo sviluppo e la visualizzazione dell'interfaccia AR, l'implementazione del filtro di Kalman e la validazione del progetto in ambiente di simulazione sono l'applicazione Unity, l'editor di codice Microsoft Visual Studio in linguaggio di programmazione C# e il visore Microsoft HoloLens 2.

6.1.1 Unity e Visual Studio

Unity è una piattaforma di sviluppo di scenari, simulazioni, applicazioni e videogames in 2D, in 3D o in Realtà Virtuale / Realtà Aumentata. È tra le più popolari e utilizzate al mondo, le applicazioni create con Unity, infatti, vantano una media di 3,6 miliardi di download mensili, e nella lista dei primi 100 videogames più popolari ben 82 sono stati sviluppati con Unity [30].

Tra le caratteristiche principali che offre Unity troviamo anche lo Unity Asset Store, una libreria virtuale che comprende migliaia di risorse gratis create da Unity Technologies e dai membri della community. Queste risorse comprendono un'enorme varietà di modelli, animazioni e textures utili per la fase di progettazione. Inoltre, fra gli asset, troviamo in particolare l'XR Interaction Toolkit, un pacchetto di sistema interattivo *component-based* che rende Unity ideale per la creazione di esperienze AR e VR.

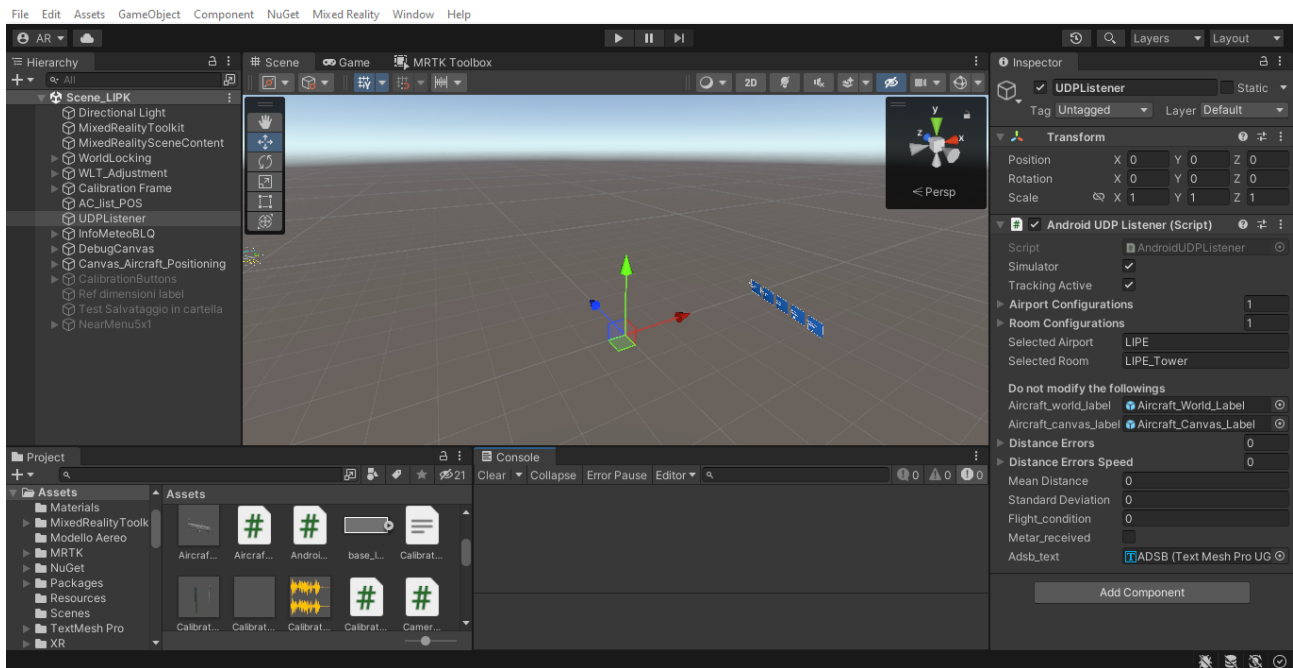


Fig. 6.1 Interfaccia del programma Unity 3D

Unity possiede un'interfaccia di programmazione API (*Application Programming Interface*), attraverso la quale è possibile assegnare particolari comportamenti più complessi agli oggetti e alla scena programmando la logica dell'applicazione. Il linguaggio di programmazione usato è C#, un linguaggio sviluppato da Microsoft che fa parte dell'ecosistema .NET ed è fra i più utilizzati dagli sviluppatori di software, videogiochi e applicazioni.

Microsoft Visual Studio è l'editor compatibile con Unity usato in questa tesi per eseguire la scrittura del programma di implementazione del filtro di Kalman.

All'interno del programma riconosciamo due funzioni principali appartenenti alla classe "*MonoBehaviour*" di C#, la quale è stata creata appositamente per sviluppare la logica in Unity.

Esse vengono utilizzate per gestire le animazioni degli oggetti su Unity, e sono "Start" e "Update":

- La funzione **Start** è eseguita solo una volta all'inizio della simulazione, in essa dunque verranno inserite le righe di codice o richiamate le funzioni che inizializzeranno gli oggetti nella scena di Unity, chiamati *Game Objects*.
- La funzione **Update** è invece eseguita ad ogni frame. Tipicamente le simulazioni hanno un rateo di frame al secondo compreso fra i 30 e i 60, quindi le righe di codice e le funzioni richiamate all'interno di questa funzione verranno eseguite quel numero di volte durante la simulazione, rendendo dunque la funzione ideale per gestire l'azione e l'animazione dei *Game Objects* [31].

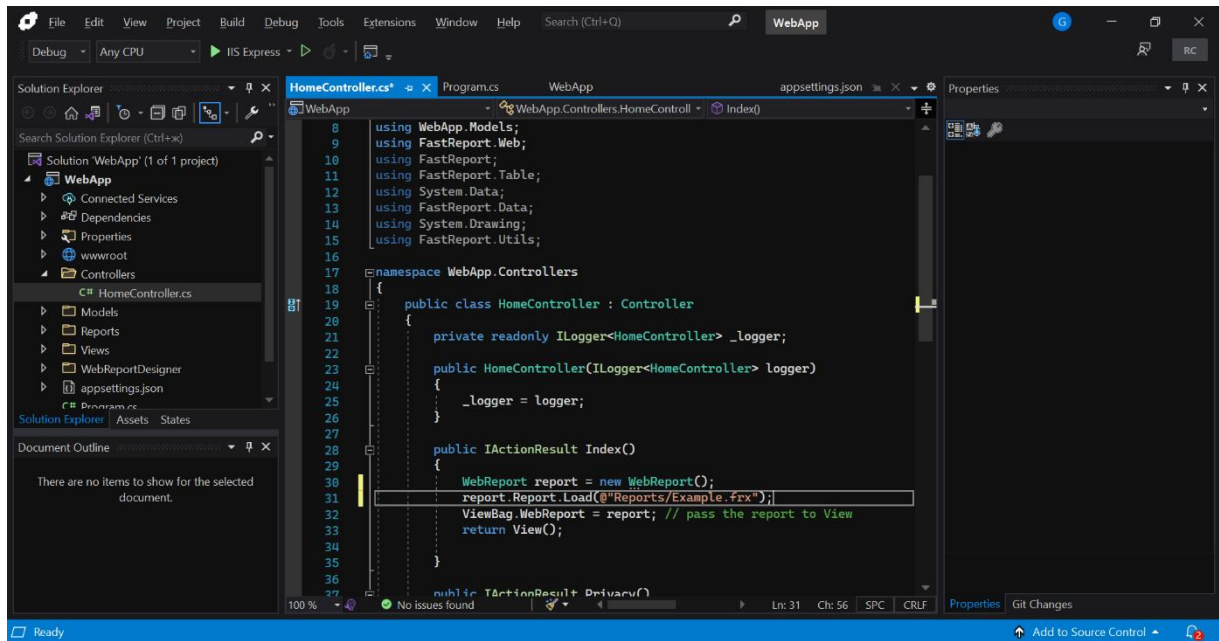


Fig. 6.2 Esempio di interfaccia di Microsoft Visual Studio

6.1.2 Visore Microsoft HoloLens 2

Il dispositivo Microsoft HoloLens 2 è la versione successiva di Microsoft HoloLens, ed è il visore utilizzato nei precedenti progetti per la visualizzazione delle label relative ai velivoli in AR. Col visore HoloLens gli ologrammi combinano il mondo digitale con l'ambiente fisico dell'utente in modo da ottenere caratteristiche visive e sonore analoghe a quelle del mondo reale. Possiede delle telecamere a infrarossi che mappano lo spazio circostante in 3D per consentire al dispositivo di posizionare gli ologrammi in modo realistico.

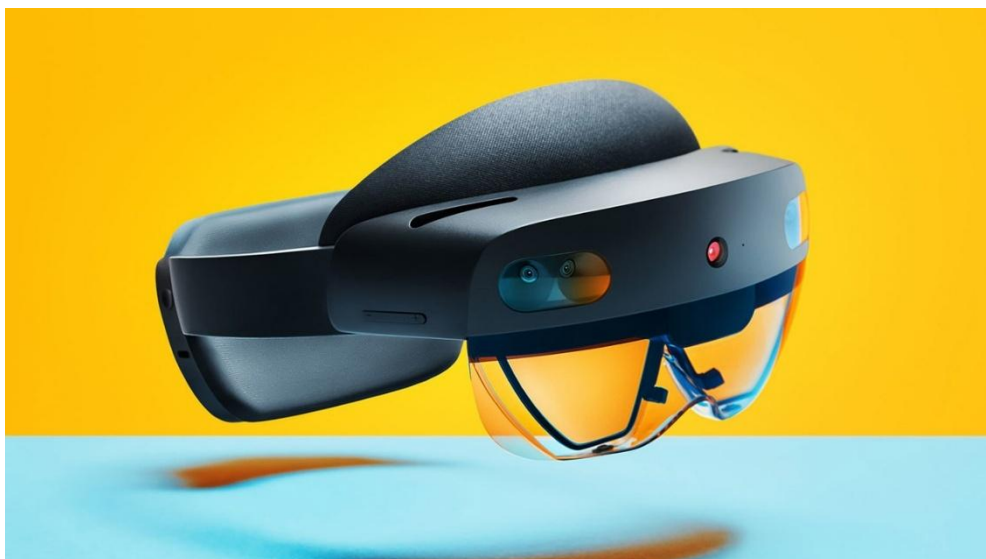


Fig. 6.3 Visore Microsoft HoloLens 2

L'utente può inoltre interagire con gli ologrammi tramite gesti con le mani, spostandoli e ingrandendoli come se fossero oggetti reali; tramite comandi vocali o tramite un sistema di tracciamento oculare, il quale traccia la direzione e lo sguardo dell'utente adattando gli ologrammi alla sua posizione e ad altri input [32].

6.2 Implementazione del filtro di Kalman su Unity

Il lavoro svolto è consistito nella scrittura e nell'implementazione degli algoritmi relativi ai due tipi di filtri di Kalman scelti per la piattaforma AR, e nella successiva validazione all'interno di un ambiente simulato che riproduce uno scenario dell'aeroporto di Bologna su Unity. In particolare, sono stati raccolti dei dati relativi agli aeromobili presenti in uno scenario reale provenienti dall'antenna ADS-B, successivamente sono stati inviati nel corretto ordine temporale ad un'applicazione eseguita all'interno di Unity, la quale dunque ha consentito la riproduzione di uno scenario reale all'interno dell'ambiente simulato.

Il codice relativo al filtro di Kalman è stato implementato su Visual Studio, con l'obiettivo di governare i movimenti delle label dei corrispondenti aeromobili in modo ottimale.

La struttura del filtro all'interno del codice ha innanzitutto previsto la creazione di una classe denominata *"EkfFilter"*, nella quale è stato implementato l'intero algoritmo con le relative funzioni richiamate successivamente all'interno del metodo *Update*. In questa classe sono state dichiarate le variabili utilizzate, divise secondo la loro appartenenza al filtro orizzontale o verticale. All'interno, dunque, vi sono i vettori di stato predetti, i vettori di stato aggiornati, le matrici di covarianza di stato, le matrici di transizione di stato e le matrici di osservazione.

Come primo passaggio si è inizializzato il filtro con il primo messaggio ADS-B, creando una funzione che prende in input i dati orizzontali e verticali che arrivano dall'antenna. Le variabili relative alla velocità angolare dell'aeromobile e alla sua accelerazione sono state inizialmente impostate a zero. Vengono inoltre definite le matrici di osservazione H e le matrici di covarianza P . Successivamente sono state create quattro funzioni, chiamate rispettivamente *"PredictHorizontal"*, *"UpdateHorizontal"*, *"PredictVertical"* e *"UpdateVertical"*, all'interno delle quali vengono impostati i passaggi logico-algebrici per le fasi di predizione (*predict*) e di aggiornamento (*update*) per i due differenti filtri orizzontale e verticale.

Riguardo al filtro orizzontale EKF con modello CTRV, all'interno della funzione *PredictHorizontal* sono state impostate le equazioni di transizione di stato che determineranno i valori dello stato dell'aeromobile predetti nell'istante di tempo successivo, divise a seconda del caso di traiettoria rettilinea o curvilinea. Sono stati inoltre impostati i valori di tuning della matrice di covarianza del rumore di processo Q (sezione 6.2.1) e infine viene calcolata la matrice di covarianza P predetta nell'istante di tempo successivo. Essendo il filtro orizzontale un filtro EKF, per calcolare quest'ultima si fa uso della matrice Jacobiana J , la quale è stata impostata nello script in una funzione a parte denominata "*CalculateJacobian*", dove di fatto sono state definite tutte le componenti della matrice J ottenute derivando le equazioni di transizione di stato f relative al calcolo delle variabili di stato da predire rispetto alle restanti variabili.

All'interno della funzione *UpdateHorizontal* si è invece definita la matrice di covarianza del rumore di misurazione R con il relativo tuning eseguito (sezione 6.2.1), viene preso in input il vettore di misurazione $\vec{Z}$ in arrivo contenente i dati ADS-B, e vengono infine impostati i passaggi visti nelle sezioni 5.2 e 5.2.1 per calcolare il valore del guadagno di Kalman K e di conseguenza il nuovo vettore di stato e la nuova matrice di covarianza P aggiornate.

Riguardo al filtro verticale con modello CA, i passaggi eseguiti all'interno delle funzioni *PredictVertical* e *UpdateVertical* seguono la stessa logica di quelli implementati nelle funzioni del filtro orizzontale, usando però chiaramente le formule teoriche previste per il filtro verticale.

Nella funzione *PredictVertical* è stato dunque definito il vettore di stato verticale previsto, calcolato con la matrice di transizione di stato F , e la matrice delle covarianze P .

Nella funzione *UpdateVertical* si è invece passati a calcolare il guadagno di Kalman K del filtro verticale e di conseguenza il nuovo vettore di stato verticale Z e la nuova matrice di covarianza P prendendo in input i dati di misurazione verticale ADS-B.

Nel caso del filtro verticale, i valori delle matrici di rumore di processo e misurazione Q e R non sono stati definiti mediante una strategia di tuning ma sono stati impostati a valori predefiniti, in quanto il filtro essendo lineare è più stabile e robusto rispetto all'orizzontale, nonché per l'utilizzo che ne viene fatto in ambito aeroportuale il piano verticale è quello in cui è tollerata una precisione minore, essendo i moti dei velivoli per la maggior parte sviluppati sul piano orizzontale, o completamente come nel caso di velivoli a terra.

Queste funzioni descritte verranno richiamate all'interno del metodo *Update*, che aggiorna lo stato del *GameObject*, in questo caso dell'aeromobile con la relativa label, ad ogni frame. In particolare esse sono state implementate all'interno di due distinti costrutti *if*.

Se non è stato ricevuto il messaggio ADS-B dell'aeromobile, allora si rientra nella casistica "*if position_updated == false*" e dunque si è nella fase di predizione del filtro. Di conseguenza verrà effettuato un controllo sulla fase in cui si trova l'aeromobile, ovvero se a terra o in volo, e in base ad essa se si trova a terra viene solo richiamata la funzione *PredictHorizontal*, mentre invece se si trova in volo allora vengono richiamate entrambe, dal momento che si ha anche spostamento verticale. La nuova posizione predetta e l'eventuale rotazione vengono quindi applicate al *GameObject* dell'aeromobile e a quello della sua label che verrà aggiornata con i nuovi dati.

Se invece il messaggio ADS-B dell'aeromobile è stato ricevuto, si rientra nella casistica "*if position_updated == true*", ovvero si è nella fase di aggiornamento del filtro. Per cui in questo caso, sempre valutando se l'aeromobile si trova a terra o in volo, verranno richiamate le funzioni sia di previsione che di aggiornamento, sarà poi il filtro che valuterà in base al guadagno di Kalman calcolato quale sarà l'aggiornamento definitivo dello stato successivo alla ricezione del messaggio ADS-B. L'aggiornamento di posizione e rotazione del velivolo viene infine applicato ai *GameObject* dell'aeromobile e della relativa label.

6.2.1 Adattamento del tuning al moto degli aeromobili

Il lavoro principale svolto in questa tesi è stato quello relativo al tuning del filtro di Kalman implementato nel programma. Si tratta di un processo piuttosto delicato perché bisogna ricercare il corretto bilanciamento tra i valori di Q e R che permetta un risultato finale ottimizzato per lo scopo del programma.

La procedura di individuazione dei valori di tuning è stata una procedura iterativa iniziata dall'apprendimento teorico del significato relativo ai valori di Q e R e l'impatto di essi sul funzionamento del filtro, proseguita poi con l'applicazione di prime bozze di valori, i quali sono stati via via perfezionati a seconda di come rispondeva la simulazione su Unity a seguito dell'implementazione.

Come accennato in sezione 6.2, l'operazione iterativa di tuning è stata eseguita solo sul filtro EKF orizzontale, essendo un filtro più complesso data la non linearità ed il più rilevante per l'obiettivo del programma. I valori di Q e R del filtro verticale sono stati preimpostati rispettivamente all'interno delle funzioni *PredictVertical* e *UpdateVertical*, risultando pari nel caso di Q a:

$$Q = \begin{pmatrix} \frac{1}{4}\Delta t^4 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \sigma_a^2 \quad (26)$$

Dove Δt è l'intervallo di tempo in secondi che intercorre tra un frame e un altro, indicato su Unity con la variabile *"Time.deltaTime"*; mentre σ_a^2 è la varianza del processo, impostata a un valore costante di 0.5.

Questi valori di Q permettono di scalare le incertezze relative a posizione, velocità e accelerazione. In particolare il termine $Q[3,3]$ relativo all'accelerazione è di valore costante, proprio per l'assunzione fatta di accelerazione costante nell'implementazione del modello del filtro verticale. Il termine $Q[2,2]$ relativo alla velocità è proporzionale al quadrato dell'intervallo di tempo, infine il termine $Q[1,1]$ relativo alla posizione è proporzionale alla quarta potenza dell'intervallo di tempo. Ciò significa quindi che l'errore accumulato sulla posizione cresce più rapidamente rispetto all'errore accumulato sulla velocità, ed entrambi sono più incerti rispetto all'accelerazione che è mantenuta costante. Questo avviene perché un eventuale errore sull'accelerazione si propaga sulla velocità, mentre sulla posizione si propaga sia l'errore di velocità intrinseco che quello portato da un errore di accelerazione e dunque accumulato nel tempo.

Nel caso di R invece, si sono impostati i valori come:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (27)$$

Scegliendo dunque valori costanti e pari a 1 sia per il rumore relativo all'altitudine misurata che per quello relativo alla velocità verticale misurata.

Per quanto riguarda il filtro orizzontale, l'operazione di tuning è stata più lunga e complessa, richiedendo diversi tentativi fino a trovare quello che meglio governa il tracciamento del velivolo e della sua label.

Si è innanzitutto notato che a seconda della situazione di manovra in cui era impegnato l'aeromobile, esso reagiva in maniera diversa in termini di rapidità e precisione di spostamento. Si è dunque deciso di dividere i valori di Q e R in diverse fasce di velocità, a seconda delle quali l'aeromobile mantiene un regime diverso e ha dunque bisogno di cambiamenti nei valori delle matrici di rumore per rimanere stabile. A seguito di diversi tentativi atti a comprendere quali avrebbero dovuto essere i valori limite per identificare le fasce di velocità caratteristiche dell'aeromobile che portassero al risultato migliore, si è scelto di suddividere i vari regimi come spiegato di seguito.

All'interno del metodo *PredictHorizontal*, l'impostazione dei valori di Q è stata implementata in maniera diversa per tre fasce di velocità:

1. **Fascia di stato quasi-statico**, compresa tra 0 e 2 nodi (1.03 metri al secondo);
2. **Fascia di velocità di taxi**, compresa tra 2 e 20 nodi (10.3 metri al secondo);
3. **Fascia di velocità di rullaggio veloce o volo**, dai 20 nodi in su.

All'interno del metodo *UpdateHorizontal*, è stata invece necessaria la diversa impostazione dei valori di R per quattro differenti fasce di velocità:

1. **Fascia di stato quasi-statico**, compresa tra 0 e 2 nodi;
2. **Fascia di transizione quasi-statico e taxi**, compresa tra 2 e 5 nodi (2.57 metri al secondo);
3. **Fascia di velocità di taxi attivo**, compresa tra 5 e 20 nodi;
4. **Fascia di velocità di rullaggio veloce o volo**, dai 20 nodi in su.

Prendendo ora in esame il caso di tuning di Q , per la fascia di velocità 1, ovvero la più bassa, si è cercato di ottenere come obiettivo la quasi immobilità del velivolo. In questo senso si sono cercati bassissimi valori di Q facendo così totale affidabilità sul modello dal momento che le velocità sono minime o nulle. Nel caso in cui all'avvio delle simulazioni gli aeromobili quasi statici continuavano ad effettuare movimenti indesiderati, i relativi valori di Q sono stati diminuiti sempre di più fino ad ottenere quelli di tuning definitivo pari a:

$$Q = \begin{pmatrix} 0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.000001 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Come si nota, i valori implementati sono minimi nel caso del rateo di virata in $Q[5,5]$ per impedire i fenomeni di auto-rotazione instabile che sono apparsi con valori più alti di questa variabile o di sviluppo di eccessive manovre angolari che a bassa velocità non sono presenti. Per lo stesso motivo si è optato con valori molto bassi in termini di posizione longitudinale e latitudinale in $Q[1,1]$ e in $Q[2,2]$, dal momento che la posizione di un aeromobile fermo o quasi fermo è estremamente prevedibile e dunque il filtro può fare completo affidamento sulle sue previsioni diventando più rigido; e anche in termini di prua in $Q[4,4]$, ottenendo una rigidità direzionale che sopprime le oscillazioni angolari attorno la propria traiettoria, presenti con valori di Q più elevati. Infine il valore

in $Q[3,3]$ corrispondente alla velocità, rimane basso ma in misura minore rispetto agli altri, ciò perché è necessario un piccolo rumore per consentire un'accelerazione fluida all'inizio del rullaggio. Entrando nella fascia numero 2 di velocità, ovvero quella intermedia, i valori di Q tendono a crescere per bilanciare l'inerzia rettilinea con l'agilità necessaria per le curve. Come si può dedurre dunque, questa è la fascia di velocità più delicata dal momento che all'interno di essa il velivolo può trovarsi sia in traiettoria rettilinea che in traiettoria curvilinea a seconda della manovra compiuta. I risultati finali di tuning di Q che hanno permesso dunque di ottenere il miglior bilanciamento fra le due fasi, sono:

$$Q = \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.25 \end{pmatrix} \quad (29)$$

In questo modo il filtro sarà più reattivo rispetto ai cambiamenti di tutte le variabili, in particolare in termini di posizione e velocità dal momento che in questa fascia di velocità vi sono cambiamenti significativi con accelerazioni e frenate da parte dell'aeromobile. Il valore relativo al rateo di virata è aumentato notevolmente ma non in maniera eccessiva, questo risultato si è potuto ottenere a seguito di diverse simulazioni, le quali hanno portato a questo compromesso dinamico che permette al velivolo di cambiare la sua velocità angolare abbastanza rapidamente da poter eseguire una curva, ma non troppo reagendo eccessivamente ai dati ADS-B e causando dunque un'eccessiva rotazione in curva con il conseguente *overshooting* della traiettoria.

Il valore relativo alla prua invece rimane più basso rispetto agli altri in modo da evitare le oscillazioni in rettilineo mantenendo l'inerzia direzionale dell'aeromobile.

Nell'ultima fascia di velocità, ovvero quella più sostenuta, si sono scelti valori in modo da garantire la massima agilità per le manovre aeree quali decollo, atterraggio ed eventuali virate, dando priorità al mantenimento della prua corretta, perché essendo a velocità elevate una minima oscillazione di prua causerebbe un errore notevole di deviazione del velivolo dalla propria traiettoria. I valori di Q assegnati in questa casistica sono dunque:

$$Q = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \end{pmatrix} \quad (30)$$

Si notano dunque i valori relativi alla posizione e alla velocità abbassati rispetto al caso precedente di rullaggio, perché ad alte velocità risultano più stabili e il modello risulta più fedele per via di forze esterne casuali o accelerazioni non modellate.

Si cerca un'alta agilità nelle virate o curve ad alta velocità e dunque un valore aumentato di $Q[5, 5]$, e infine un valore minimo relativo alla prua, che è fondamentale rimanga stabile a velocità elevate per evitare grossi errori di tracciamento.

Prendendo ora in esame il caso del tuning della matrice di rumore di misurazione R implementato all'interno della funzione *UpdateHorizontal*, si riconoscono valori diversi a seconda dei 4 casi di velocità.

Esclusivamente nella fascia di velocità minima, la matrice R è una matrice 3x3, che va dunque a scartare il dato di rumore proveniente dalla prua. Ciò è stato implementato perché a velocità minime, i dati ADS-B sono molto rumorosi e soggetti a errore; dunque, il velivolo interpretava la minima oscillazione rumorosa ricevuta in termini di prua come un dato per il quale andare a correggere la sua prua corrente, traducendo il tutto in una situazione di movimento rotazionale su sé stesso, talvolta incontrollato. Si è dunque deciso a seguito di ciò di far ignorare al filtro il dato di prua perché molto inaffidabile. La restante matrice ha come valori:

$$R = \begin{pmatrix} 50 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix} \quad (31)$$

Dove si nota un elevato valore pari a 50 attribuito alla posizione per evitare che il velivolo consideri i dati rumorosi provenienti dall'ADS-B alle basse velocità e dunque evitare teletrasporti o salti di posizione rilevanti. Anche il dato relativo alla velocità è alto, ma non eccessivamente come la posizione dal momento che alle basse velocità eventuali salti di velocità sono meno significativi.

Nella seconda e nella terza fascia di velocità, ovvero quelle di rullaggio, oltre a re-introdurre il dato sulla prua, i restanti dati sono uguali a meno di quello relativo alla velocità.

La matrice R scelta per la fascia di velocità compresa fra 2 e 5 nodi è:

$$R = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{pmatrix} \quad (32)$$

Mentre invece quella scelta per la fascia di velocità compresa fra 5 e 20 nodi è:

$$R = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Si può notare innanzitutto il calo dei valori relativi alla posizione, essendo ora il sensore più affidabile a velocità più elevate. Il dato relativo alla prua è invece più basso, aumentando la fiducia nella misurazione ADS-B. Si è arrivati a questa conclusione a seguito di problemi di tracciamento dell'aeromobile in curva con un importante lag a livello di prua, il quale è via via diminuito man mano che si è abbassato questo dato, dal momento che il filtro diventa costretto a correggere rapidamente la sua prua quando arriva il messaggio ADS-B, eliminando il lag e l'*overshooting* nelle curve più strette. Il dato relativo alla velocità invece è quello che ha giustificato la divisione della fascia di velocità di rullaggio in altre due sottofasce, passando con l'aumentare di essa da un valore di 8 a un valore di 2. Questo perché man mano che la velocità aumenta il dato ADS-B tende ad essere più affidabile, mentre se il velivolo si è appena mosso o si sta fermando (fascia di velocità 2), subentrano fluttuazioni più importanti della velocità a causa dell'attrito, della spinta iniziale o della frenata o a errori di sensore.

Infine si arriva ai valori assegnati alla matrice R nel caso di velocità di rullaggio sostenuto o di volo, che corrispondono a:

$$R = \begin{pmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.00001 \end{pmatrix} \quad (34)$$

Dove si nota complessivamente un calo su tutti i valori dal momento che le misurazioni con l'elevata velocità diventano più affidabili. In particolare, similmente a quanto visto per la matrice di rumore di processo Q , è stato scelto un valore relativo alla prua minimo in modo da avere una fiducia quasi assoluta nella misurazione della prua, eliminando qualsiasi tipo di deviazione dalla traiettoria standard che porterebbe a importanti errori a causa dell'elevata velocità.

6.3 Risultati finali ottenuti

Alla luce di quanto esposto riguardo l'implementazione del filtro di Kalman su Unity e il relativo tuning dei parametri delle matrici di rumore di processo e di misurazione Q e R , in questa sezione verranno descritti i risultati finali che sono stati ottenuti con lo sviluppo di questo algoritmo.

Innanzitutto grazie all'implementazione del filtro di Kalman che gestisce le fasi di predizione di traiettoria, si ottiene un movimento continuo e fluido della label relativa all'aeromobile durante il percorso di esso. Il movimento, dunque, non risulta più essere discreto come accadeva quando venivano utilizzati come aggiornamento solo i dati grezzi provenienti dall'antenna ADS-B. Come spiegato nelle sezioni 6.2 e 6.2.1, sono state eseguite diverse simulazioni per studiare e comprendere il comportamento dei velivoli in funzione delle modifiche apportate alla struttura del filtro e al suo tuning. Dopo i diversi tentativi di tuning si è quindi arrivati ad assumere come quella che ha dimostrato il miglior bilanciamento fra le varie fasi di manovra sia la struttura descritta in sezione 6.2.1.

In particolare, sono stati definiti diversi comportamenti da parte dei velivoli proprio in base alle manovre eseguite in rullaggio o in volo.

La fase di rullaggio in traiettoria rettilinea è quella dove il risultato ottenuto dall'implementazione del filtro è il più fluido fra tutti. In questo caso la label segue un andamento ottimale durante la fase di predizione del filtro lungo il percorso grazie ai valori bassi implementati nella matrice Q .



Fig. 6.4 Esempio di velivoli in traiettoria rettilinea all'interno di una simulazione Unity

Si riconosce tuttavia un leggero ritorno della label in una posizione più arretrata all'arrivo di un nuovo aggiornamento ADS-B. Ad ogni modo, dal momento che l'algoritmo è stato implementato con dati preregistrati provenienti da segnali ADS-B autentici ma all'interno di uno scenario simulato, la movimentazione delle label causata da questi dati corrisponde a quella dei relativi aeromobili; perciò, non avendo un riscontro con una vista da una torre di controllo nel mondo reale, non si può

quantificare di quanto la label sia discostata rispetto l'aeromobile. Tuttavia, il problema principale affrontato in questa tesi è quello di assicurare un movimento fluido della label, dal momento che per il controllore non è importante che la label rimanga sempre nella stessa posizione relativa all'aeromobile, difatti un leggero spostamento di essa è tollerato purché non si discosti troppo dal relativo velivolo. Ciò che è importante è che la label non faccia evidenti salti di posizione, perché potrebbe diventare difficile leggerne il contenuto o seguirne l'avanzamento. Al fine dunque di limitare i salti di posizione della label più evidenti all'arrivo di un nuovo messaggio ADS-B, nel codice è stato implementato un algoritmo di *smoothing* che, all'aggiornamento del filtro, in caso di errore, tende a spalmarlo in un intervallo di tempo prestabilito senza spostare immediatamente la label dall'ultima posizione calcolata.

Nella fase di ripartenza e di frenata dell'aeromobile a bassissime velocità, circa sotto i 3 / 4 nodi, si può talvolta notare che la label fa più fatica ad avere un andamento fluido e continuo, ma tende a spostarsi con qualche scatto, a causa dell'elevato rumore intrinseco dei dati ADS-B alle basse velocità. Un esempio più lampante di questa casistica si ha nel caso della manovra di pushback, effettuata tipicamente a una velocità del velivolo di circa 2 nodi. Tuttavia ciò non costituisce un impedimento importante dal momento che la velocità dell'aeromobile è talmente bassa che non si ottiene uno spostamento compromettente della label, inoltre si tratta di una fase transitoria che dura pochi secondi fin quando il velivolo non riprende il suo rullaggio a velocità più sostenuta, oppure fin quando non si ferma se si è nel caso della frenata.

Nella fase di curva si è avuta la situazione più delicata da trattare durante lo studio del filtro, a causa della ricerca del bilanciamento esatto fra agilità del velivolo richiesta in traiettoria curvilinea e stabilità direzionale richiesta in traiettoria rettilinea. Come visto nella fase di tuning del filtro, infatti, l'aeromobile si trova ad eseguire le curve in rullaggio ad un valore di velocità col quale effettua anche manovre di rullaggio rettilineo, per cui si cercano valori di Q e R di compromesso per i quali entrambe le manovre risultino ottimali.

Dal punto di vista della curva, dunque, si è notato come risultato finale che la label tende a seguire quella che è la traiettoria reale del velivolo, ma con qualche fenomeno di lag o *overshooting* in termini di prua. In particolare si può dire che la curva non risulta perfettamente continua durante tutto il moto curvilineo, ma all'arrivo dell'aggiornamento del messaggio ADS-B il velivolo tende a correggere il suo stato di prua in misura più marcata. Nello specifico, se il filtro è poco reattivo al nuovo aggiornamento del sensore, dunque con valori di Q bassi, esso non svilupperà la curva abbastanza velocemente e dunque si tende ad accumulare un errore sulla prua che quando viene

corretto si traduce in un lag visivo della label; al contrario se il filtro possiede valori di Q alti risultando dunque molto reattivo agli aggiornamenti ADS-B, esso svilupperà una curva più decisa, dove se viene superato il valore di prua che possiede nel corrente il velivolo reale, alla correzione del messaggio si ottiene un fenomeno di *overshooting* della prua reale da parte della label. Ad ogni modo, i valori di tuning implementati e discussi in questa tesi sono stati quelli che hanno portato fra tutti i tentativi eseguiti a una minimizzazione di questi due fenomeni.

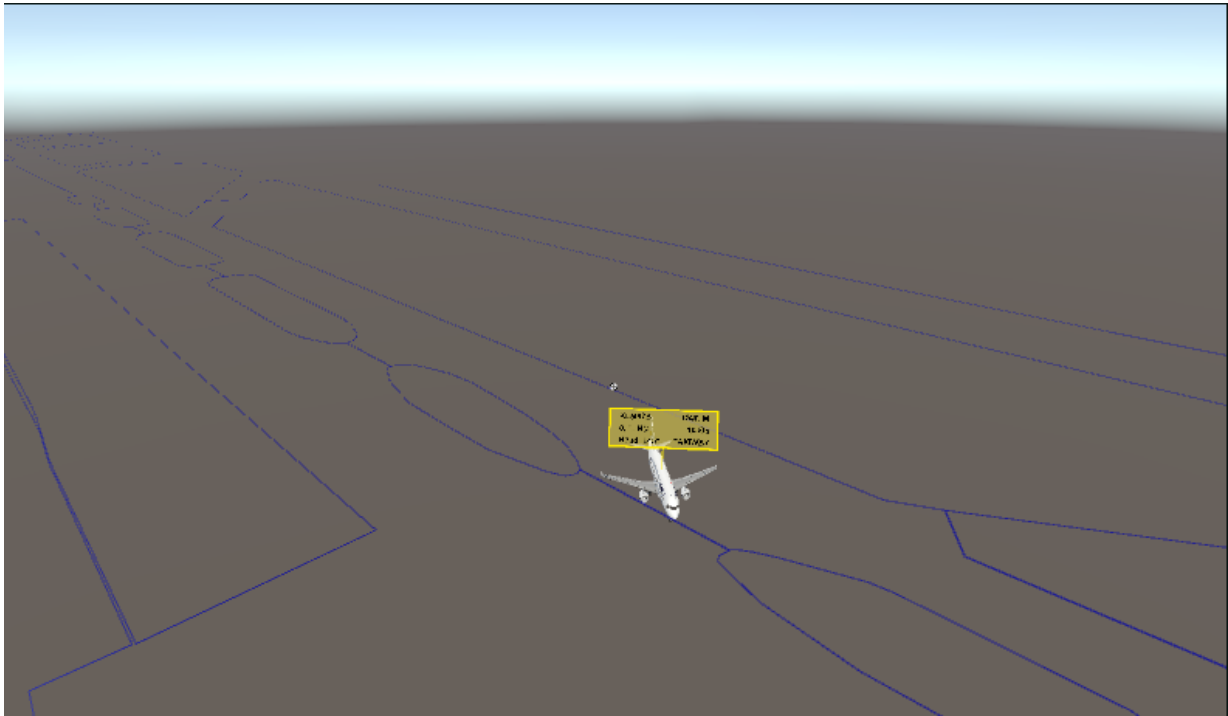


Fig. 6.5 Esempio di velivolo in traiettoria curvilinea in uscita dalla via di rullaggio per recarsi al gate di destinazione

All'interno della simulazione, la criticità più rilevante che è stata notata avviene tipicamente quando l'aeromobile deve compiere una rotazione di 90 gradi per l'inserimento in testata pista in vista della fase di decollo. In questa precisa situazione si ottengono gli errori massimi, con la label che tende a ritardare l'ingresso in curva rispetto alla traiettoria reale, e la successiva stabilizzazione a valle della curva che avviene con numerosi scatti di posizione nell'intorno di essa. Le motivazioni principali che stanno dietro a questo comportamento possono essere spiegate dal fatto che questa casistica combina una curva "a gomito" con dunque un'alta manovrabilità richiesta, insieme a un andamento del velivolo a bassa velocità con la conseguenza quindi di dati ADS-B più soggetti a rumore. Inoltre, in questa fase, a causa di una leggera problematica di trasmissione dell'antenna, la distanza fra due

Un ultimo fattore da sottolineare è che, nonostante le limitazioni presenti in queste ultime situazioni descritte, la label riporta sempre i dati corretti reali relativi all'aeromobile, dunque anche in caso di lag e *overshooting* della prua, o scatti di posizione e velocità, le informazioni riportate sulla label saranno sempre quelle corrette, la limitazione dunque in questi casi è ristretta solo alla visualizzazione della posizione a video e non all'affidabilità dei dati riportati.

7 Conclusioni

Partendo dall'esigenza iniziale di ricercare un algoritmo da implementare per la piattaforma Unity di gestione delle label in Realtà Aumentata che ottimizzasse il tracciamento dei velivoli nell'area aeroportuale in modo da aumentare la fruibilità del sistema all'interno di una Torre di Controllo, in questa tesi sono state discusse metodologie matematiche di risoluzione del problema ed è stata scelta l'implementazione di un filtro di Kalman individuato come metodo più adatto per l'obiettivo finale. Il filtro di Kalman è stato successivamente diviso in due modelli diversi a gestione del piano orizzontale e del piano verticale, a causa dei movimenti differenti intrapresi dai velivoli e delle diverse variabili matematiche che entrano in azione, in modo così da ottimizzare il più possibile lo scenario.

Successivamente si è dedicata particolare attenzione all'implementazione di un corretto tuning delle variabili in gioco, al fine di ottenere il miglior risultato possibile in termini di tracciamento e predizione della traiettoria dei velivoli e delle relative label.

I risultati ottenuti evidenziano come il metodo sia ottimale nel tracciamento dei velivoli in traiettorie di rullaggio o di volo rettilinee, pur tollerando qualche movimento a scatti della label nelle primissime fasi di partenza e nella fase di stop del velivolo in corrispondenza del gate di arrivo o dei punti attesa prima della pista. Tuttavia, persistono fasi come ad esempio manovre di taxi in curva dove la qualità dei risultati tende a ridursi causando un tracciamento del velivolo da parte della label meno fluido e più soggetto a scatti, fino a fasi più critiche come l'ingresso in testata pista del velivolo compiendo una curva di 90 gradi a velocità molto bassa, dove l'errore compiuto dal tracciamento della label è molto più significativo.

Queste difficoltà riscontrate sono riconducibili a delle limitazioni presenti nella scelta dei valori di tuning delle matrici Q e R del filtro del Kalman. Difatti, nel tuning bisogna accettare un compromesso tra comportamenti del velivolo opposti, in traiettoria rettilinea si vuole avere un filtro che renda il movimento della label stabile ignorando eventuali deviazioni dalla traiettoria classificandole come rumore, mentre in traiettoria curvilinea si vuole avere un filtro che renda il movimento della label agile e manovrabile, in modo da seguire al meglio la traiettoria reale dell'aeromobile.

Il filtro di Kalman presentato in questa tesi, dunque, è una buona soluzione di compromesso fra i vari comportamenti del tracciamento della traiettoria dei velivoli, ad ogni modo questi risultati

descritti offrono una base per il miglioramento del problema di tracciamento, agendo in maniera mirata sulle criticità evidenziate.

Soluzioni future possono prevedere un intervento di affinazione del filtro, agendo per esempio nella fase di tuning, sui parametri presenti fuori dalla diagonale principale delle matrici, considerando così una dipendenza degli errori fra le diverse variabili; oppure considerando un'ulteriore divisione nei valori di tuning in base al settore di aeroporto in cui è presente l'aeromobile (stand, apron, taxi o runway) . Inoltre, è possibile l'implementazione di nuove tipologie di filtro più specifiche quali ad esempio l'UKF descritto brevemente in questa tesi in sezione 5.2.2, o l'utilizzo di nuovi algoritmi di *smoothing* per migliorare la traiettoria visiva delle label nelle fasi più critiche di curva. Tutte queste diverse opzioni possono essere strade che aprono a ottimi risultati per un corretto tracciamento dei velivoli in Realtà Aumentata.

L'importanza dell'applicazione di questi sistemi all'interno del controllo del traffico aereo e dei benefici che essi possono portare, rafforza la validità dello studio e della ricerca in questo particolare settore ingegneristico.

Bibliografia

- [1] ENAC, *Report trimestrale dati di traffico – II trimestre 2025*, 2025.
- [2] Masotti N., Bagassi, S. & De Crescenzo, F., *Augmented Reality for the Control Tower: The RETINA Concept*, in *Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics. Cham: Springer International Publishing, pp. 444 – 452, 2016.
- [3] Fadda T., Bagassi S. & Corsi M., *ADS-B Driven Implementation of an Augmented Reality Airport Control Tower Platform*, *Materials Research Proceedings* 37, pp. 767 – 770, 2023.
- [4] ICAO, Doc.4444, *Procedures For Air Navigation Services – Air Traffic Management (PANS – ATM)*, 16th Edition, ICAO, pp. 25, 154, 2016.
- [5] Fly Free Airways, *Come viene gestito il controllo del traffico aereo e quali sono le sue principali sfide?*, <https://www.flyfreeairways.com/controllo-del-traffico-aereo/>, 2024, consultato il 06 ottobre 2025.
- [6] ENAV, *Cosa facciamo*, <https://www.enav.it/cosa-facciamo>, consultato il 06 ottobre 2025.
- [7] SKYbrary, *How Air Traffic Control Works*, <https://skybrary.aero/articles/how-air-traffic-control-works>, consultato il 06 ottobre 2025.
- [8] ICAO, Annex 11 to the Convention on International Civil Aviation, *Air Traffic Services*, 15th Edition, ICAO, pp. 34, 36, 2018.
- [9] Esposito, G., *Regolamentazione Aeronautica, Trasporto e Logistica – Conduzione del mezzo aereo*, 5^a Edizione, Antonio Esposito Edizioni, Forlì, Italia, pp. 32 – 37, 41, 172, 283 – 294, 2019.
- [10] Trebbi, R., *Teoria del Volo*, 5^a Edizione, Aviabooks, Torino, Italia, Sez. 1, pp. 94, 96 - 97, 101 - 102, 2016.
- [11] Desk Aeronautico, *Struttura e classificazione dello spazio aereo italiano*, <https://www.deskaeronautico.it/spazi-aerei/>, consultato il 07 ottobre 2025.

- [12] ENAV, *Sistemi di sorveglianza*, <https://www.enav.it/node/17161>, consultato il 07 ottobre 2025.
- [13] Sun, J., *The 1090 Megahertz Riddle - A Guide to Decoding Mode S and ADSB Signals*, 2nd Edition, TU Delft OPEN Publishing, 2021.
- [14] Fast-Berglund, A., Gong, L. & Li, D., *Testing and validating Extended Reality (xR) technologies in manufacturing*, 8th Swedish Production Symposium, SPS 2018, 16-18 May 2018, Stockholm, Sweden, pp. 31-38, 2018.
- [15] Vasarainen, M., Paavola, S. & Vetoshkina, L., *A Systematic Literature Review on Extended Reality: Virtual, Augmented and Mixed Reality in Working Life*, International Journal of Virtual Reality, vol. 21, no. 2, pp. 1-28, 2021.
- [16] Laato, S., Xi, N., Spors, V., Thibault, M. & Hamari, J., *Making Sense of Reality: A Mapping of Terminology Related to Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality, XR and the Metaverse*, Proceedings of the 57th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 6625 – 6634, 2024.
- [17] Interaction Design Foundation, *Extended Reality (XR)*, <https://www.interaction-design.org/literature/topics/extended-reality-xr?srsltid=AfmB0orqQ04q3iys4aRkbAeBej1ZoPuxlzMT0PFc5-uoDNjP04t0lq7X>, consultato il 16 ottobre 2025.
- [18] Zaman, A., Rahman Abir, M. & Mursalin, S., *Extended reality in education and training: Enhancing trustworthiness*, International Journal of Science and Research Archive, pp. 1705 – 1720, 2024.
- [19] Zhang, J., Feijoo-Garcia, M.A., Gu, Y., Popescu, V., Benes, B. & Magana, A.J., *Virtual and Augmented Reality in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) Education: An Umbrella Review*, 2024.
- [20] SESAR, *About SESAR - Discover SESAR*, <https://www.sesarju.eu/discover-sesar>, consultato il 09 ottobre 2025.
- [21] SESAR, *About SESAR – Vision*, <https://www.sesarju.eu/vision>, consultato il 09 ottobre 2025.

- [22] SESAR, *European ATM Master Plan – Making the most efficient and environmentally friendly sky to fly in the world*, pp. 7 – 8, 2025.
- [23] Masotti, N., Bagassi, S. & De Crescenzo, F., *Augmented Reality for the Control Tower: The RETINA Concept*, International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics, pp. 444 – 452, 2020.
- [24] UNIBO Magazine, *Il progetto RETINA tra i vincitori dei Digital European Sky Awards 2021*, <https://magazine.unibo.it/archivio/2021/06/23/il-progetto-retina-tra-i-vincitori-dei-digital-european-sky-awards-2021>, 2021, consultato il 09 ottobre 2025.
- [25] Santarelli, R., Bagassi, S., Corsi, M. & Teutsch, J., *Towards a digital control tower: the use of augmented reality tools to innovate interaction modes*, SESAR innovation days, 2022.
- [26] Gao, Y., Chen, X., Cheng, X., Zhang, C., Su, Z. & Hao, J., *Method for Reconstructing Aircraft Trajectory in Surface Augmented Reality System*, 5th International Conference on Traffic Engineering and Transportation System (ICTETS 2021), Chongqing, China, 2021.
- [27] Olive, X., Krummen, J., Figuet, B. & Alligier, R., *Filtering Techniques for ADS-B Trajectory Preprocessing*, Journal of Open Aviation Science (2024), Vol.2, 2025.
- [28] Olive, X., Mori, R. & Waltert, M., *Filtering Aircraft Surface Trajectories Using Information on the Taxiway Structure of Airports*, Proceedings of the 111th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2024), Singapore, 2024.
- [29] Terejanu, G.A., *Unscented Kalman Filter Tutorial*, Wiley Online Library, University at Buffalo, Buffalo, USA, 2011.
- [30] Unity, *Go Create*, <https://unity.com/>, consultato il 10 ottobre 2025.
- [31] Unity, *Unity Learn – Unity Essential – Creating a rotating collectible*, <https://learn.unity.com/pathway/unity-essentials/unit/programming-essentials/tutorial/create-a-rotating-collectible?version=6.0>, consultato il 10 ottobre 2025.
- [32] Microsoft Learn, *HoloLens 2 funzionalità e soluzioni*, <https://learn.microsoft.com/it-it/hololens/hololens-commercial-features>, 2025, consultato il 10 ottobre 2025.

Ringraziamenti

Per concludere, intendo dedicare questo spazio per ringraziare tutti coloro che hanno reso possibile questo straordinario percorso.

Desidero innanzitutto ringraziare la Professoressa Sara Bagassi e l'Ingegnere Tommaso Fadda per avermi dato la possibilità di compiere questo lavoro di tesi, e per aver mostrato straordinaria disponibilità e professionalità nello svolgere il ruolo di relatrice e correlatore, dandomi tutto il supporto necessario e fornendomi preziosi consigli durante l'apprendimento dei concetti, lo svolgimento delle implementazioni e delle simulazioni e la stesura finale dell'elaborato.

Un ringraziamento particolare va a tutta la mia famiglia, la quale mi ha sostenuto e supportato durante ogni singolo giorno, dall'immatricolazione al corso di studio fino ai momenti finali di stesura di questo elaborato. Mi ritengo fortunato nell'essere stato accompagnato fin dall'inizio in questa scelta e in tutti i momenti facili e difficili che si sono presentati durante i tre anni, oltre che di aver potuto contare su un aiuto prezioso, sincero e concreto riguardo qualsiasi decisione da dover prendere affinché il risultato potesse essere il migliore per me.

Ringrazio poi tutti i miei amici con i quali ho trascorso tre anni memorabili, sia dentro che fuori l'università. Grazie a voi che avete contribuito a rendere l'università non solo come un luogo di studio e di dovere, ma come un'esperienza che ci si porterà dietro per sempre e della quale indubbiamente se ne sentirà la mancanza. Con voi è stato più facile imbarcarsi ogni volta nei viaggi interminabili in treno per noi pendolari, cercando insieme di raggiungere in qualche modo l'università anche per una lezione di qualche ora fra scioperi, coincidenze perse, l'Intercity in costante ritardo, il 7 murato di persone. Ed è stato più bello insieme a voi trascorrere il tempo in università tra le sessioni in aula studio, le pause in giardino, i pranzi a mensa, le lezioni improbabili fino alle 19, divertendoci sempre, anche in quelli che erano i giorni più duri.

Voglio infine fare un enorme ringraziamento a te che nonostante tutto ci sei sempre stata per me, indipendentemente dal momento, supportandomi nei giorni più intensi di studio a ridosso delle sessioni di esame, nei periodi più complicati e in qualsiasi scelta che ho dovuto intraprendere. Sono stato fortunato ad aver avuto accanto una persona come te durante questi tre anni, la quale ha sempre fatto di tutto per sostenermi sia all'interno che al di fuori di questo percorso, e ha sempre voluto il meglio per me e soprattutto fatto il tifo per me, in ogni occasione. Molto di questo risultato che ho orgogliosamente ottenuto va anche a te.