

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA
- Sede di Forlì –

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe: L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
In Costruzioni Aeronautiche

Implementazione di algoritmi di predizione di traiettoria per il
tracciamento in realtà aumentata di velivoli in area aeroportuale

CANDIDATO
Lorenzo Sansoni

RELATORE
Sara Bagassi
CORRELATORE
Tommaso Fadda

Anno Accademico 2023-2024

Abstract

Il controllo del traffico aereo è una funzione critica per garantire la sicurezza e l'efficienza delle operazioni aeree, in un contesto globale caratterizzato da un costante incremento del traffico e da una crescente complessità operativa. I controllori del traffico aereo devono prendere decisioni rapide e accurate, spesso sotto pressione, utilizzando strumenti tecnologici avanzati per gestire i flussi di velivoli in modo sicuro e coordinato.

Questa tesi esplora il ruolo dei controllori del traffico aereo e le sfide che affrontano, con un focus particolare sull'adozione di tecnologie innovative per migliorare i processi operativi. Tra queste, la realtà aumentata (AR) si distingue per il suo potenziale di trasformare il settore, offrendo interfacce visive che integrano dati operativi con l'ambiente reale, migliorando la percezione situazionale e supportando decisioni critiche.

Nello specifico, questa tesi si concentra sullo sviluppo e sulla valutazione di algoritmi per la simulazione delle traiettorie di velivoli, con particolare attenzione alla loro applicazione nelle fasi operative di decollo, atterraggio e taxi in un ambiente di simulazione 3D creato con Unity. L'obiettivo principale dello studio è analizzare la precisione e l'affidabilità di due algoritmi utilizzati per predire la traiettoria degli aeromobili confrontandoli attraverso l'utilizzo di dati statistici come l'errore medio e lo scarto quadratico medio. I risultati mostrano che, mentre entrambi gli algoritmi sono in grado di riprodurre accuratamente il comportamento degli aeromobili nelle fasi di decollo e atterraggio, la fase di taxi in curva risulta particolarmente critica a causa della complessità dei movimenti non lineari e delle variazioni di velocità.

Indice

1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 STRUTTURA DELLA TESI.....	2
2. STATO DELL'ARTE.....	3
2.1 AIR TRAFFIC MANAGEMENT	3
2.2. TECNICHE DI SORVEGLIANZA AERONAUTICHE	4
2.2.1 Il radar primario (PSR, Primary Surveillance Radar)	5
2.2.2 Il radar secondario SSR (Secondary Surveillance Radar)	7
2.2.3 ADSB: tecnologia e funzionamento	9
2.3 I PROGRAMMI DI RICERCA	13
2.4 LA REALTÀ AUMENTATA (AR)	14
2.4.1 AR in torre di controllo aeroportuale	15
3. UNA PIATTAFORMA PER L'AR IN UNO SCENARIO AEROPORTUALE OPERATIVO.....	17
4. METODO.....	21
4.1 STRUMENTI UTILIZZATI	21
4.1.1 Unity	21
4.1.2 C# e Visual Studio	21
4.1.3 Microsoft HoloLens 2	23
4.2 ALGORITMI IMPLEMENTATI PER LA PREDIZIONE DELLA POSIZIONE DI UN AEREO	24
4.2.1 Traiettoria di un velivolo	24
4.3 FORMULAZIONE DEGLI ALGORITMI DI PREDIZIONE DELLA TRAIETTORIA E ANALISI DEI RISULTATI	25
4.4 METODOLOGIA DI RICERCA	28
5. RISULTATI	30
5.1 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI.....	30
5.3 SVILUPPI FUTURI PER LA PREDIZIONE DELLA TRAIETTORIA	34
6. CONCLUSIONI.....	36
BIOGRAFIA	37

1. Introduzione

Il controllo del traffico aereo (Air Traffic Control, ATC) è una componente fondamentale per garantire la sicurezza, l'efficienza e la fluidità delle operazioni aeree in un contesto globale sempre più complesso. I controllori del traffico aereo operano in un ambiente altamente dinamico, dove ogni decisione richiede un'elevata prontezza mentale, una solida preparazione tecnica e l'utilizzo di strumenti avanzati per monitorare e gestire il flusso di velivoli nello spazio aereo e nelle aree aeroportuali.

Con il costante aumento del traffico aereo e l'evoluzione tecnologica, diventa sempre più urgente trovare soluzioni innovative che possano supportare i controllori nelle loro attività, migliorando non solo l'efficienza operativa, ma anche la sicurezza e la sostenibilità del sistema.

In questo contesto, la ricerca si è concentrata su nuovi strumenti e tecnologie, tra cui la realtà aumentata (AR). Questa tecnologia risulta molto promettente per il settore, con particolare riferimento al controllo del traffico di aerodromo, offrendo un'interfaccia visuale interattiva in grado di integrare le informazioni operative con l'ambiente reale, migliorando la percezione situazionale e facilitando le decisioni critiche.

Per questo motivo anche il gruppo di ricerca in "Tecnologie digitali e metodi di progetto per applicazioni aerospaziali" dell'università di Bologna, attraverso i progetti di RETINA (Resilient Synthetic Vision for Advanced Control Tower Air Navigation Service Provision) [1] e DDT (Digital Technologies for Tower) [2], finanziati da SESAR, è stato uno dei primi a esplorare l'applicazione della realtà virtuale/aumentata per il controllo del traffico aereo nelle torri di controllo aeroportuali, andando a testare un nuovo concept in uno scenario simulato, sfruttando dei visori Microsoft HoloLens..

Successivamente, la ricerca presso l'università di Bologna è proseguita con lo sviluppo di una piattaforma per l'ambiente reale, un cui primo prototipo è già stato testato in una torre di controllo operativa, presso l'aeroporto di Bologna. Tale applicazione, in particolare, sfrutta un'antenna ADS-B per ricevere i dati di sorveglianza utili per tracciare le posizioni degli aerei tramite la realtà aumentata [3] [4].

Pur funzionando correttamente, la piattaforma presenta ancora dei limiti, soprattutto legati alla fluidità del tracciamento, in AR, del movimento degli aerei, dovuti alla frequenza di aggiornamento del sistema di sorveglianza ADS-B, alla copertura limitata dell'antenna, nonché ai limiti intrinseci del sistema in ambienti altamente trafficati [5]. Queste problematiche sono state segnalate da diversi controllori di volo come limitanti per una corretta ed efficace fruizione della piattaforma di realtà

aumentata implementata. Pertanto, la presente tesi si propone di continuare il lavoro di sviluppo della piattaforma, attraverso il miglioramento degli algoritmi implementati per tenere traccia della posizione degli aerei in tempo reale, risolvendo così alcuni attuali limiti del sistema, e andando poi a verificare la validità degli sviluppi implementati.

1.1 Struttura della tesi

Per una comprensione più chiara di questa tesi, viene fornita una breve panoramica della sua struttura. Il capitolo 2 presenta una revisione della letteratura, con un focus sul contesto industriale del lavoro e sulla ricerca che ha portato e motivato il progetto. Viene fornita un'analisi completa degli studi e degli sviluppi precedenti che hanno influenzato la direzione di questa tesi.

Nel capitolo 3 viene descritto lo sviluppo, la progettazione e il test di una piattaforma basata sulla Realtà Aumentata (AR) per supportare gli operatori delle torri di controllo aeroportuali.

Successivamente, nel capitolo 4 sono stati descritti i metodi e gli strumenti utilizzati per raccogliere i dati delle simulazioni, evidenziando le principali tecniche di analisi applicate per misurare la precisione delle previsioni, tra cui anche l'analisi di dati statistici come l'errore medio e la differenza quadratica media. Sono stati inoltre forniti dettagli sulla configurazione delle simulazioni, per chiarire come i dati siano stati generati e raccolti, e per garantire la ripetibilità e la coerenza dell'analisi.

Questo capitolo, inoltre, ha affrontato l'analisi dei risultati, concentrandosi sulle principali differenze riscontrate tra la prima simulazione e la seconda.

Nel Capitolo 5, i risultati ottenuti sono stati analizzati da una prospettiva qualitativa, mettendo in evidenza le principali criticità emerse dalle simulazioni.

2. Stato dell'arte

In questo capitolo viene presentato un resoconto sui principali aspetti teorici che precedono e motivano il lavoro svolto in questo progetto di tesi.

2.1 Air Traffic Management

Il traffico aereo rappresenta uno dei settori fondamentali della mobilità globale moderna, con milioni di passeggeri che ogni giorno viaggiano attraverso rotte aeree internazionali e domestiche. Questo flusso intenso di aeronavi richiede un sistema di gestione estremamente sofisticato, noto come Air Traffic Management (ATM), che garantisce la sicurezza, l'efficienza e la regolarità dei voli. L'ATM comprende una serie di processi, infrastrutture e tecnologie destinati a monitorare, controllare e coordinare il traffico aereo, riducendo i rischi di collisioni e ottimizzando l'uso dello spazio aereo. Le operazioni di ATM si articolano in diverse fasi, che vanno dalla pianificazione delle rotte al controllo in volo, con un coordinamento continuo tra i controllori del traffico aereo, le compagnie aeree e i sistemi di gestione del traffico. Inoltre, con l'evoluzione della tecnologia, l'ATM sta affrontando nuove sfide legate all'integrazione della mobilità aerea avanzata (Advanced Air Mobility – AAM), alla gestione dell'incremento del traffico aereo, alla sostenibilità ambientale.

L'Advanced Air Mobility (AAM), consiste nell'integrazione di nuovi sistemi per il trasporto aereo, tra cui droni e air taxi, all'interno di spazi urbani, suburbani e rurali, con l'obiettivo di rendere la mobilità più efficiente, sostenibile e accessibile. L'AAM si concentra proprio sull'utilizzo di velivoli innovativi per offrire servizi di trasporto passeggeri e merci.

L'ATM si articola principalmente in tre componenti: il controllo del traffico aereo (Air Traffic Control, ATC), la gestione del flusso del traffico (Air Traffic Flow management, ATFM) e i servizi del traffico aereo (Air Traffic Services, ATS).

1. Air Traffic Control (ATC): è il cuore del sistema ATM. I controllori del traffico aereo sono responsabili di monitorare e dirigere i voli durante le diverse fasi del volo: decollo, volo in rotta e atterraggio. Lo spazio aereo, all'interno del quale avvengono tutte le operazioni, viene suddiviso in settori di controllo, ciascuno gestito da una torre di controllo aeroportuale (atterraggio, operazioni a terra e partenza) o da centri di controllo aereo remoti (solitamente

- per la gestione del traffico in rotta e della fase di avvicinamento). I controllori utilizzano radar, sistemi di comunicazione e dati in tempo reale per monitorare la posizione degli aerei (sorveglianza) e fornire istruzioni per evitare conflitti e garantire il flusso ordinato del traffico.
2. Air Traffic Flow Management (ATFM): è un sistema che si occupa di regolare il flusso di traffico aereo in modo da evitare sovraffollamenti nello spazio aereo, soprattutto in aree ad alta densità di traffico, come gli aeroporti principali o le rotte internazionali. L'ATFM cerca di bilanciare la domanda di traffico con l'offerta di capacità, stabilendo limiti sul numero di aerei che possono essere autorizzati a volare in determinate aree o in determinati momenti. Ad esempio, può essere richiesto alle compagnie aeree di posticipare o anticipare le partenze in base alla disponibilità dello spazio aereo.
 3. Air Traffic Services (ATS): comprendono una serie di servizi di supporto che permettono la gestione delle rotte aeree, dalla pianificazione delle rotte alle procedure di decollo e atterraggio. Una rotta aerea si sviluppa nello spazio aereo, solitamente attraversando diversi settori in cui esso è suddiviso, ciascuno di essi avente regolamenti specifici per evitare conflitti tra i voli. I piloti sono tenuti a seguire le rotte prestabilite, che possono essere adattate in base alle condizioni meteo o ad altre variabili operative.

Di questi elementi, il controllo del traffico aereo è il più rilevante per gli scopi di questa tesi. In particolare, è di interesse approfondire il concetto di sorveglianza aeronautica, e le principali tecniche di cui essa si avvale, come sarà discusso nella sezione seguente.

2.2. Tecniche di sorveglianza aeronautiche

Le tecniche di sorveglianza aeronautiche servono a garantire la sicurezza, l'efficienza e il controllo delle operazioni del traffico aereo. Attraverso sistemi avanzati come radar primari e secondari, ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) e sistemi di monitoraggio satellitare, queste tecniche permettono solitamente di identificare gli aeromobili presenti all'interno di un determinato settore aereo e di tracciarne in tempo reale informazioni rilevanti come la posizione, la velocità e l'altitudine degli aeromobili. Ciò consente ai controllori del traffico aereo di gestire con precisione il movimento degli aerei, prevenire collisioni, ottimizzare le rotte e garantire una separazione sicura tra i velivoli. Inoltre, la sorveglianza aeronautica supporta le operazioni di emergenza, facilita le indagini su incidenti e contribuisce a migliorare la gestione complessiva dello spazio aereo, soprattutto in contesti con traffico elevato o in condizioni meteo avverse.

Le più diffuse tecniche di sorveglianza sono il radar primario, che rileva la posizione degli aerei tramite riflessione di onde radio, e il radar secondario, che trasmette un impulso che viene ricevuto dall'equipaggiamento di bordo (transponder) per ricevere una risposta dallo stesso, contenente informazioni dettagliate come altitudine e identificativo del volo. In tempi più recenti è stato introdotto il sistema di sorveglianza ADS-B, che sta trovando sempre più diffusione dopo essere stato reso obbligatorio negli ultimi anni [3] su tutti i velivoli commerciali nell'Unione Europea e negli Stati Uniti. Questo sistema permette agli aerei di trasmettere un set più ampio di dati rispetto ai sistemi di sorveglianza convenzionali, tra cui la posizione GNSS in tempo reale. Queste tecnologie, integrate nei centri di controllo del traffico aereo, garantiscono la sicurezza e l'efficienza dei voli, consentendo di prevenire i conflitti e ottimizzare le rotte.

2.2.1 Il radar primario (PSR, Primary Surveillance Radar)

Il radar primario (Figura 1) è uno strumento fondamentale nella gestione del traffico aereo (ATM) e viene utilizzato per rilevare la posizione degli aeromobili nello spazio aereo senza richiedere loro alcuna cooperazione attiva. È una delle tecnologie radar più antiche e ancora essenziali, soprattutto per garantire la sicurezza in aree con traffico elevato o in situazioni in cui i sistemi di sorveglianza dipendenti, come l'ADS-B, non sono disponibili.

Esso si basa sul principio dell'eco radar (Figura 1) in cui l'antenna radar ruota (di solito a una velocità di 5-12 giri al minuto) ed emette un impulso di onde radio. Quando l'impulso raggiunge un aeromobile (o un altro oggetto), l'onda viene riflessa e parte dell'energia ritorna all'antenna.

Il radar, infatti, riceve gli impulsi riflessi (eco) e calcola la distanza, misurando il tempo impiegato dall'impulso per andare e tornare, e la direzione, determinando l'angolo di provenienza dell'eco rispetto alla posizione del radar.

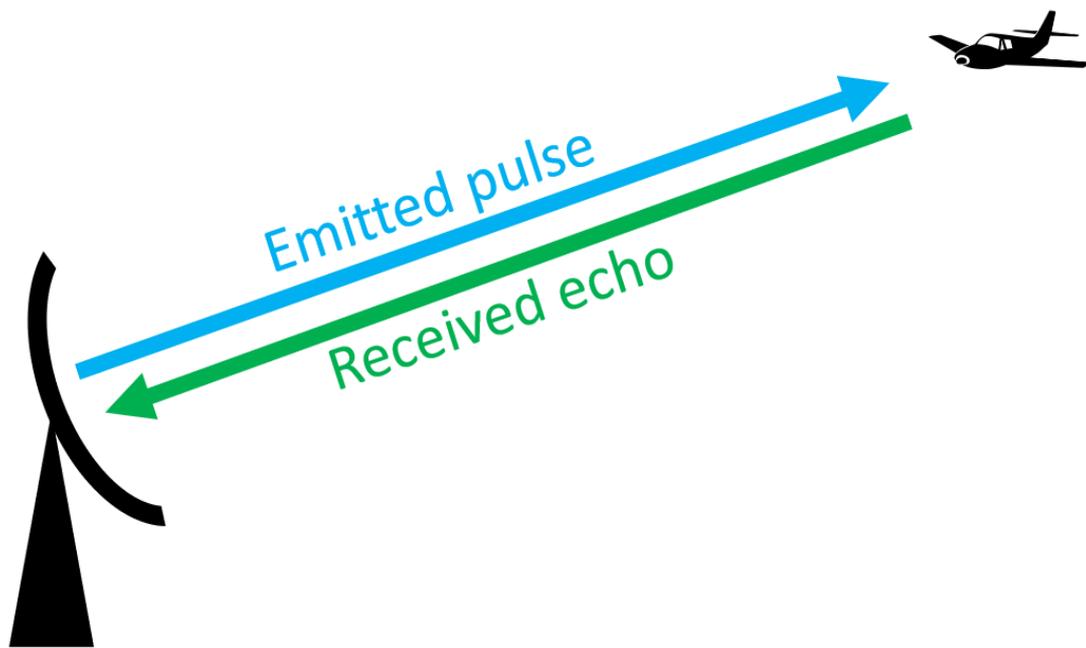


Figura 1. Rappresentazione grafica del funzionamento del radar primario

Le sue caratteristiche principali si possono riassumere in 4 punti differenti:

1. **Indipendenza dagli aeromobili:** Non richiede alcuna apparecchiatura a bordo degli aerei per funzionare.
2. **Rilevamento di oggetti non collaborativi:** Può rilevare qualsiasi oggetto riflettente, inclusi velivoli privi di transponder, droni o persino detriti.
3. **Copertura a lungo raggio:** I radar primari utilizzati per il controllo del traffico aereo possono rilevare oggetti fino a 200-250 miglia nautiche di distanza, a seconda della potenza e delle condizioni atmosferiche.
4. **Precisione relativa:** Fornisce informazioni precise su posizione e distanza, ma non è in grado di determinare direttamente l'altitudine (serve un radar secondario o un transponder per queste informazioni).

Il PSR ha però delle limitazioni:

1. **Riflessioni spurie:** Può rilevare anche oggetti non rilevanti (uccelli, edifici, ecc.), che devono essere filtrati.
2. **Sensibilità alle condizioni atmosferiche:** Pioggia, neve o turbolenze possono influire sulla qualità del segnale

3. **Richiede manutenzione:** A causa dell'alta potenza impiegata, i radar primari possono essere soggetti a guasti o degrado con l'uso.
4. **Informazioni limitate:** Non fornisce dati sull'identità dell'aeromobile o sull'altitudine, a meno che non sia integrato con un radar secondario.
5. **Risoluzione Angolare:** Il fascio radar incidente ha una dimensione minima.
6. **Economiche:** il sistema è eccessivamente costoso.

Per rispondere ad alcune limitazioni di questo sistema, è stato sviluppato e poi introdotto il radar secondario Secondary Surveillance Radar - SSR).

2.2.2 Il radar secondario SSR (*Secondary Surveillance Radar*)

Il **radar secondario SSR** (Figura 2) è una tecnologia avanzata utilizzata nell'aviazione civile e militare per identificare e monitorare aeromobili nello spazio aereo. A differenza del radar primario, il radar secondario richiede una collaborazione attiva degli aeromobili, che devono essere equipaggiati con un transponder a bordo.

Il transponder è un dispositivo elettronico installato sugli aeromobili, fondamentale per la gestione del traffico aereo. Il termine "transponder" deriva dalla combinazione di **transmitter** (trasmettitore) e **responder** (risponditore). Si tratta di un sistema che riceve segnali da un radar secondario, li elabora e risponde automaticamente fornendo informazioni specifiche sull'aeromobile.

Il suo funzionamento comprende: una prima parte di ricezione del segnale in cui il transponder riceve un segnale di interrogazione inviato da un radar secondario a terra o da altri sistemi come il TCAS (Traffic Collision Avoidance System) a bordo di un altro velivolo. Successivamente, lo elabora, decodificando il segnale ricevuto e preparando una risposta contenente le informazioni di sorveglianza richieste, estratte dai sistemi avionici di bordo. Infine, vi è una fase di trasmissione in cui il transponder invia un segnale di risposta al radar contenente le informazioni richieste, codificate.

Esistono diversi tipi di transponder che operano in diverse modalità, ognuna con funzionalità specifiche:

1. **Mode A:**
 - Trasmette un codice identificativo a quattro cifre (squawk code), assegnato dai controllori di volo.
 - Utilizzato per identificare l'aeromobile nel radar.
2. **Mode C:**

- Oltre al codice identificativo, fornisce anche l'altitudine barometrica dell'aeromobile.
- Essenziale per la gestione verticale del traffico aereo.

3. **Mode S:**

- Supporta comunicazioni avanzate e interrogazioni selettive.
- Trasmette un identificativo univoco dell'aeromobile (24 bit).
- Migliora l'efficienza riducendo le interferenze tra più risposte radar.
- Lo stesso transponder è utilizzato anche per sistemi come ADS-B e TCAS.

Tornando al radar secondario (Figura 2), esso opera attraverso un meccanismo di interrogazione e risposta in cui il radar ruota (di solito a una velocità di 5-12 giri al minuto) e trasmette un impulso che viene ricevuto dall'equipaggiamento di bordo (transponder). Il transponder invia una risposta contenente almeno un codice (se opera in Modalità A), ma più spesso questa è combinata con il livello di volo (Modalità C) o altre informazioni, come l'identificazione dell'aeromobile, il livello selezionato, ecc. (Modalità S). Queste risposte vengono decodificate per ottenere dati sull'aeromobile relativi all'identificazione (codice transponder o "squawk code"), all'altitudine (da un altimetro collegato al transponder e alla posizione (tramite il tempo di risposta e la direzione).

Le informazioni ricevute dipendono dalla modalità di interrogazione (A, C o S) e dalle capacità del transponder.

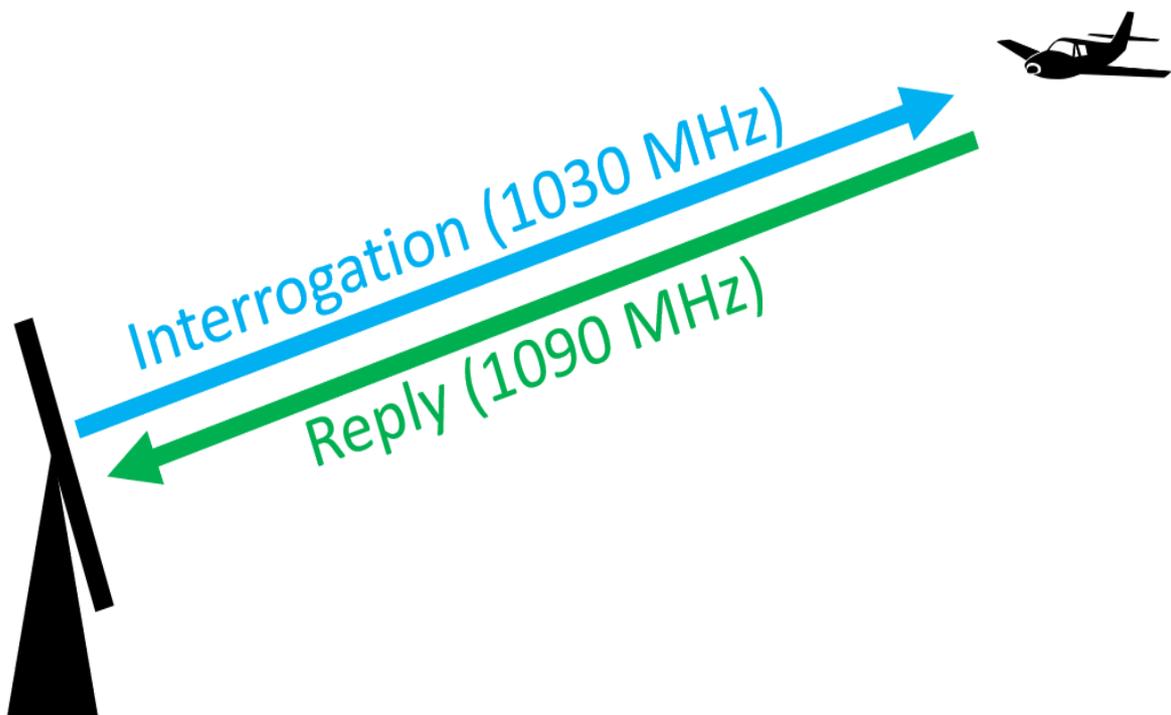


Figura 2. Rappresentazione grafica del funzionamento del radar secondario

Tra i benefici principali del SSR vi è la possibilità per i controllori del traffico aereo di sapere quale aeromobile stanno monitorando, rilevare l'altitudine grazie al transponder Mode A/C o Mode S, fornendo dati più dettagliati rispetto al radar primario, e rilevare aeromobili a distanze maggiori rispetto al PSR, grazie all'uso di segnali a radiofrequenza più efficienti.

Anche il radar secondario, come il primario, ha dei limiti:

1. **Richiede equipaggiamento a bordo:** Gli aeromobili devono essere dotati di un transponder funzionante.
2. **Dipendenza da risposte attive:** Se il transponder è disattivato o guasto, il radar non riceve dati.
3. **Vulnerabilità a interferenze:** Le frequenze possono essere soggette a disturbi o jamming.
4. **Costi di implementazione:** Richiede investimenti sia per i sistemi a terra che per gli aeromobili.

Un sistema più evoluto del radar secondario, che può sopperire ai problemi citati in precedenza, è l'ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) che utilizza i dati GNSS per trasmettere automaticamente dati di posizione e altitudine.

2.2.3 ADSB: tecnologia e funzionamento

L'**ADS-B** (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*) è una tecnologia avanzata per la sorveglianza del traffico aereo che sfrutta le trasmissioni automatiche degli aeromobili per fornire dati in tempo reale sulla loro posizione, altitudine, velocità e direzione. È una componente chiave dei moderni sistemi ATM, ed è considerata un pilastro dell'evoluzione verso un controllo del traffico aereo più efficiente e sostenibile [6].

ADS-B significa:

1. **Automatic:** Non richiede l'intervento umano, il sistema trasmette automaticamente i dati.
2. **Dependent:** Si basa sui sistemi di navigazione a bordo dell'aeromobile (ad esempio il sistema di navigazione satellitare).
3. **Surveillance:** Fornisce informazioni per il controllo del traffico aereo.
4. **Broadcast:** Trasmette i dati continuamente a tutti i ricevitori nelle vicinanze in ascolto.

Il suo funzionamento si può riassumere nel seguente modo:

1. **Trasmissione dei dati dall'aeromobile.** Ogni aeromobile dotato di transponder ADS-B trasmette periodicamente informazioni relative a:
 - Posizione (derivata dal GPS o altri sistemi di navigazione satellitare).
 - Altitudine e velocità.
 - Rotta e identificativo del volo.
 - Altri parametri utili, come il rateo di salita/discesa e informazioni sullo stato del velivolo e del volo.
2. **Ricezione dei dati.** Le trasmissioni ADS-B sono ricevute da:
 - Stazioni terrestri: Trasmettono l'informazione al controllo del traffico aereo (ATC).
 - Altri aeromobili: Consentono la condivisione della situazione del traffico in tempo reale (sistema *ADS-B In*).
3. **Elaborazione e utilizzo.** I dati ricevuti vengono integrati nei sistemi di gestione del traffico aereo e visualizzati su schermi per i controllori di volo e i piloti. Questo migliora la consapevolezza situazionale, specialmente in aree prive di copertura radar.

Proprio per le sue caratteristiche, l'ADS-B è stato introdotto per affrontare le crescenti sfide nella gestione del traffico aereo, in particolare l'aumento esponenziale del numero di voli, la necessità di una maggiore efficienza operativa e la spinta verso una sostenibilità ambientale. Le tecnologie radar tradizionali, pur affidabili, presentano limitazioni in termini di copertura, precisione e costi. L'ADS-B, invece, sfrutta la tecnologia GNSS e le comunicazioni digitali per fornire una sorveglianza aerea più avanzata e accessibile.

Di conseguenza, questo sistema di sorveglianza porta diversi benefici:

1. **Maggiore precisione**
 - Fornisce dati di posizione basati su tecnologie GNSS, con una precisione molto superiore rispetto ai radar primari o secondari.
 - Aggiornamenti più frequenti (anche più volte al secondo) rispetto ai radar tradizionali, che hanno cicli di scansione più lenti.
2. **Copertura estesa**
 - Supporta il monitoraggio globale con l'ausilio di satelliti (es. ADS-B satellitare).
 - Funziona in aree prive di copertura radar tradizionale, come oceani, regioni montuose e aree polari.
3. **Efficienza operativa**

- Permette una separazione più ridotta tra aeromobili, aumentando la capacità dello spazio aereo.
 - Consente rotte più dirette e profili di volo ottimali, riducendo i consumi di carburante.
- 4. Riduzione dei costi**
- Le stazioni terrestri ADS-B sono meno costose da costruire e mantenere rispetto ai radar tradizionali.
 - Gli operatori aerei beneficiano di una gestione più efficiente del traffico.
- 5. Sicurezza migliorata**
- Consente una maggiore consapevolezza situazionale per i piloti, grazie all'ADS-B In, che fornisce informazioni sul traffico circostante.
 - Migliora la sorveglianza in tempo reale per i controllori del traffico aereo.
- 6. Flessibilità**
- Facilita l'integrazione con nuovi tipi di aeromobili, come droni e velivoli elettrici avanzati, in scenari di AAM.

Anche l'ADS-B, come i sistemi di sorveglianza descritti in precedenza, ha dei limiti legati a:

- 1. Dipendenza dal GPS**
- Il sistema si basa sulla precisione dei segnali GNSS. Se questi vengono disturbati (jamming) o falsificati (spoofing), le prestazioni dell'ADS-B possono essere compromesse.
- 2. Vulnerabilità alla sicurezza**
- Le trasmissioni ADS-B non sono crittografate, il che le rende potenzialmente vulnerabili a interferenze, intercettazioni o manipolazioni.
 - Non è possibile garantire l'autenticità del segnale senza ulteriori misure di sicurezza.
- 3. Necessità di equipaggiamento a bordo**
- Gli aeromobili devono essere dotati di transponder compatibili con l'ADS-B, il che comporta costi aggiuntivi per gli operatori, specialmente per aeromobili più vecchi o di piccole dimensioni.
- 4. Costi di implementazione per le infrastrutture**
- Sebbene più economico dei radar, l'ADS-B richiede una rete di stazioni terrestri per funzionare, e l'installazione può essere complessa in alcune aree.
- 5. Dipendenza da linea di vista**
- Come i radar tradizionali, l'ADS-B si basa su trasmissioni radio dirette, il che può limitarne l'efficacia in ambienti montuosi o con ostacoli.

6. Aree ad alta densità

- In spazi aerei molto affollati, l'elevato volume di trasmissioni ADS-B può causare problemi di congestione del segnale, portando alla perdita di dati o alla decodifica di messaggi errati.

I messaggi ADS-B sono principalmente trasmessi nella modalità **Mode S Extended Squitter (ES)**, un'estensione del transponder Mode S e si distinguono per i contenuti trasmessi e le finalità operative (Tabella 2).

I messaggi di identificazione e Call Sign trasmettono l'identificativo del volo (call sign) o il codice del volo assegnato dall'operatore (es. "DLH123") ed hanno una frequenza di trasmissione di 0.2 Hz circa (1 messaggio ogni 5 secondi).

I messaggi di posizione (latitudine e longitudine), invece, trasmettono le coordinate precise dell'aeromobile, determinate tramite il sistema di GNSS a bordo, con una frequenza di trasmissione di 2Hz circa.

Un'altra tipologia è quella dei messaggi di velocità (Ground Speed e Velocità Relativa) che trasmettono la velocità rispetto al suolo (Ground Speed), la direzione del moto rispetto al nord magnetico (rotta) e la velocità verticale (in salita o discesa). La loro frequenza di trasmissione è 1 volta al secondo.

Infine, tra i messaggi più rilevanti vi è quello di Stato del sistema. Questa tipologia di messaggio trasmette le informazioni sullo stato del sistema dell'ADS-B e altri sensori a bordo, indicando eventuali malfunzionamenti o limitazioni nella precisione dei dati trasmessi.

Altri messaggi secondari, sono quelli di integrità dei dati e di informazioni supplementari.

Un messaggio ADS-B ha una lunghezza totale di 112 bit: i primi 5 bit corrispondono al formato di downlink 17. I bit 6-8 indicano le capacità del transponder. Successivamente viene incluso il codice del transponder a 24 bit (conosciuto anche come codice ICAO). Gli ultimi due segmenti sono il payload, composto da 56 bit e contenente le principali informazioni di sorveglianza, e 24 bit utilizzati per il controllo di parità (Tabella 1).

Tabella 1. Nella tabella seguente vengono rappresentate le informazioni chiave di un messaggio ADS-B

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

Tabella 2. Nella tabella vengono rappresentate le varie tipologie di un messaggio 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 (<i>no TCAS RA and Squawk Code change</i>) 1.25 Hz (<i>change in TCAS RA or Squawk Code</i>)		
Target states and status	29	-	- 0.8 Hz	
Operational status	31	0.2 Hz	0.4 Hz (<i>no NIC/NAC/SIL change</i>)	
			1.25 Hz (<i>change in NIC/NAC/SIL</i>)	

2.3 I programmi di ricerca

Per far fronte alle crescenti sfide del sistema di trasporto aereo, ormai congestionato da livelli di traffico eccessivi, con continui ritardi e interruzioni del servizio, sono stati introdotti nei primi anni duemila i progetti NextGen (negli Stati Uniti) e SESAR (nell'Unione Europea), per poter indirizzare la ricerca nel settore in maniera coerente ed efficace.

Questi progetti hanno portato allo sviluppo di nuove soluzioni come il Free Route Airspace e il Collaborative Decision Making (CDM) [7], che migliorano la flessibilità, l'efficienza e la sostenibilità del traffico aereo.

In particolare, SESAR (Single European Sky ATM Research) è un progetto di ricerca e sviluppo europeo volto a modernizzare e rendere più efficienti i sistemi di gestione del traffico aereo (ATM) in Europa. Il suo obiettivo è migliorare la sicurezza, ridurre la congestione e l'impatto ambientale

dell'aviazione, aumentando l'efficienza operativa del sistema aereo europeo. SESAR fa parte dell'iniziativa più ampia del Single European Sky (Cielo Unico Europeo), che cerca di creare uno spazio aereo unico e senza confini attraverso i diversi paesi membri dell'Unione Europea, per migliorare la gestione del traffico.

SESAR si concentra sull'adozione di nuove tecnologie e processi innovativi per ottimizzare la gestione del traffico aereo, come l'uso di sistemi di sorveglianza avanzati (come l'ADS-B), miglioramento della gestione delle rotte, l'implementazione di sistemi di navigazione satellitare (GNSS), e lo sviluppo di una comunicazione più efficiente tra piloti e controllori.

Tra queste innovazioni SESAR sta esplorando anche l'uso di interfacce uomo-macchina (human-machine interfaces) avanzate e, in particolare, l'uso di tecnologie emergenti come la realtà aumentata (Augmented Reality - AR) nelle torri di controllo aeroportuali.

2.4 La Realtà Aumentata (AR)

La realtà aumentata è un tipo di interfaccia uomo-macchina avanzata, e fa parte delle cosiddette tecnologie di Realtà Estesa (eXtended Reality - XR). XR è un termine generale per racchiudere tutte quelle tecnologie che cercano di unire, sfruttando diversi livelli sensoriali, un substrato di elementi sintetici digitali con la percezione che l'utente ha del mondo reale, sfruttando principalmente il livello visivo e uditivo.

L'Extended Reality (XR) racchiude convenzionalmente tre diverse tecnologie, che si differenziano per le diverse modalità con cui la realtà e gli elementi virtuali sono fusi insieme nella percezione dell'utente:

1. La Realtà Virtuale (VR): Un ambiente completamente virtuale in cui gli utenti sono immersi grazie a dispositivi come visori VR.
2. La Realtà Aumentata (AR): Sovrapposizione di elementi digitali (immagini, suoni, dati) sul mondo reale, visibili attraverso dispositivi come smartphone, tablet o occhiali AR.
3. La Realtà Mista (MR): Integrazione tra mondo reale e virtuale, dove oggetti digitali interagiscono dinamicamente con l'ambiente fisico e viceversa.

La realtà aumentata, in particolare, è una parte cruciale per lo studio di questa tesi. Il funzionamento di questa tecnica si basa su alcuni elementi fondamentali:

1. Rilevamento dell'ambiente: Un'applicazione AR deve prevedere la comprensione dell'ambiente fisico dell'utente. Questo è fondamentale per posizionare accuratamente gli oggetti digitali nel mondo reale.

2. **Elaborazione dei dati:** una volta raccolte le informazioni sull'ambiente, il sistema AR le elabora per creare e posizionare accuratamente i contenuti digitali.
3. **Sovrapposizione e Rendering:** dopo aver elaborato i dati, il sistema AR combina le informazioni digitali con l'ambiente reale.

Il tracking e la registrazione (registration) sono due processi fondamentali per il funzionamento della Realtà Aumentata (AR). Questi processi permettono al sistema di ancorare gli oggetti virtuali al mondo reale, garantendo una sovrapposizione accurata e coerente con i movimenti dell'utente e dell'ambiente.

Il tracking, in particolare, consiste nel monitorare continuamente la posizione e l'orientamento dell'utente o del dispositivo per aggiornare la posizione degli oggetti virtuali rispetto al mondo reale. Si compone di tre fasi:

1. **Inizializzazione:** Identifica un punto di riferimento iniziale (marker o superficie).
2. **Monitoraggio Continuo:** Aggiorna la posizione del dispositivo o degli oggetti virtuali rispetto al punto di riferimento.
3. **Correzione degli Errori:** Compensa errori di misurazione o movimenti imprevisti.

Esistono, anche, dei limiti per quanto riguarda questo processo. Uno di questi riguarda la "latenza" nell'elaborazione dei dati (sia dell'ambiente che del livello digitale) che può portare a rendere l'interazione meno fluida. Un altro limite riguarda, invece, quello relativo alla possibilità di avere spazi affollati o con pochi riferimenti visivi, che possono ostacolare il tracking. In sintesi, si può affermare che questa tecnologia avanzata può aumentare notevolmente quelli che sono i benefici dei controllori del traffico aereo come, ad esempio, una migliore consapevolezza situazionale, una ottimizzazione della gestione del traffico e una prevenzione migliore nelle possibili collisioni.

2.4.1 AR in torre di controllo aeroportuale

Le ricerche condotte negli anni passati hanno dimostrato che, quando applicata al controllo del traffico aereo, l'AR ha portato a un miglioramento delle prestazioni dei controllori del traffico aereo (ATCO), a un incremento della loro consapevolezza situazionale (Situational Awareness – SA) e a ridurre il loro carico cognitivo, consentendo un'interazione più naturale ed efficiente con i sistemi di controllo presenti in torre [8].

L'idea principale è quella di presentare un overlay di informazioni digitali tramite display a visione trasparente montati sulla testa, sovrapposti alla vista reale dall'interno della torre, che permettono al controllore di visualizzare i dati fondamentali dei velivoli all'interno del visore stesso, con l'intento di stimolare i controllori ad operare in una posizione "head-up" (con la testa sollevata) e quindi ridurre

il numero di cambiamenti tra una posizione "head-up" e una "head-down" anche in condizioni di scarsa visibilità. In questo modo, i controllori potrebbero ridurre il tempo trascorso guardando verso il basso e migliorare la loro SA.

Infatti, l'introduzione di tecnologie come la Realtà Aumentata (AR), potrebbe portare a visualizzare informazioni ausiliarie generate dal computer come sovrapposizioni sulla vista del mondo reale, migliorando l'identificazione e il tracciamento degli aerei, specialmente in condizioni di scarsa visibilità. In questo modo, l'attenzione degli ATCO non sarebbe continuamente divisa tra due prospettive diverse dello stesso ambiente (vista esterna della torre e strumenti ausiliari), con benefici in termini di aumentata consapevolezza situazionale e ridotto carico di lavoro.

Diversi studi e progetti preliminari sono stati condotti negli ultimi decenni grazie ai progressi nelle tecnologie come la realtà virtuale e aumentata, nonché nelle torri di controllo remote e virtuali (RVT). In particolare, il gruppo di ricerca in "Tecnologie digitali e metodi di progetto per applicazioni aerospaziali" dell'Università di Bologna ha portato avanti il progetto RETINA, (Resilient Synthetic Vision for Advanced Control Tower Air Navigation Service Provision), svolto nel framework di SESAR. Questo progetto è stato uno dei primi a esplorare l'applicazione della realtà virtuale/aumentata per il controllo del traffico aereo nelle torri di controllo, confrontando display montati sulla testa (head-up display - HUD) dell'utilizzatore, e quindi solidali ad esso, e schermi conformi fissi nello spazio. Queste tecnologie erano usate per sovrapporre informazioni aggiuntive come etichette di volo digitali e layout degli aerodromi sulla vista reale del controllore (vedi Figura 3 nel capitolo successivo), per monitorare e guidare il movimento dei velivoli. Al progetto RETINA, ha fatto seguito il progetto DTT (Digital Technologies for Tower) anch'esso finanziato nell'ambito del programma europeo SESAR (Single European Sky ATM Research) e portato avanti all'interno del laboratorio di "Realtà Virtuale e Simulazione" dell'Università di Bologna nella sua Soluzione 97.1 EXE-002. "Il progetto mirava a modernizzare e digitalizzare le torri di controllo aeroportuali utilizzando tecnologie avanzate come la Realtà Aumentata (AR), l'intelligenza artificiale (AI) e l'apprendimento automatico, e l'università di Bologna si è concentrata sulle piattaforme di simulazione e sulle tecnologie sfruttate per dimostrare come la Realtà Virtuale/Aumentata (V/AR) insieme alle Label di Tracciamento, alle Air Gestures e alla Guida dell'Attenzione Attention Guidance, possano consentire al controllore del traffico aereo (Air Traffic Control Operator – ATCO) di aumentare il tempo di osservazione diretta dello scenario di traffico esterno alla torre (head-up time), anche in condizioni di bassa visibilità, per ridurre il tempo di reazione a situazioni critiche o di allarme, ridurre il carico di lavoro e migliorare la Consapevolezza Situazionale (SA) e la produttività" [2].

In sintesi, l'applicazione della Realtà Aumentata nel controllo del traffico aereo migliora la consapevolezza situazionale dei controllori, riducendo il carico cognitivo e migliorando l'efficienza operativa. Tecnologie come gli head-up display e i progetti RETINA e DTT hanno dimostrato che sovrapporre informazioni digitali al mondo reale consente di monitorare meglio gli aerei, anche in condizioni di scarsa visibilità, riducendo i tempi di reazione e migliorando la produttività [8].

3. Una piattaforma per l'AR in uno scenario aeroportuale operativo

Dopo aver testato le applicazioni in ambiente simulato, ci si è occupati di trasferire i risultati ottenuti al mondo reale. Grazie alla realtà aumentata è stata elaborata un'interfaccia uomo-macchina per le torri di controllo aeroportuali. Essa si concentra sulla piattaforma di simulazione e sulle tecnologie utilizzate per dimostrare come la Realtà Virtuale e Aumentata possano consentire un'interazione più naturale ed efficace nella torre di controllo aeroportuale.

A tal proposito è stata creata una piattaforma, sviluppata in Unity3D (Figura 4) e visualizzata con un dispositivo AR, Microsoft HoloLens2, che ha mostrato la capacità di: tracciare gli aeromobili in tempo reale utilizzando i dati di un'antenna ADS-B tramite wi-fi e visualizzarli dagli operatori delle torri di controllo, tramite etichette virtuali sovrapposte agli aeromobili reali. Queste etichette virtuali (label) contengono le informazioni di sorveglianza utili al controllore e identificano la posizione reale dell'aereo nella sua visuale.

Le informazioni, inviate alla piattaforma, sono state raccolte attraverso strumenti specifici, come antenne, in grado di raccogliere i dati reali di aeromobili e salvarli per poter ripetere la simulazione ogni volta fosse necessario. Queste informazioni mostrano i dati principali del velivolo: categoria di turbolenza di scia, velocità rispetto al suolo, altezza dal suolo, distanza dall'osservatore in miglia nautiche, l'identificativo del volo (callsign) e l'angolo di prua rispetto al nord geografico.

L'altezza del velivolo, quando quest'ultimo è a terra, viene sostituita da una indicazione sul settore aeroportuale all'interno del quale il velivolo si sta muovendo. La label acquisisce un colore in base a ciò che l'aereo sta svolgendo dentro questo spazio aereo. Ad esempio, in Figura 3, il rettangolo è azzurro, colore che rappresenta l'intento del velivolo di decollare. Se sarà giallo, al contrario, il velivolo sta atterrando.



Figura 5. Rappresentazione grafica di un buco di segnale evidenziato dal ritardo del posizionamento della Label

La soluzione proposta dimostra di supportare gli ATCO nel lavorare più frequentemente in una posizione "head-up" (ovvero osservando direttamente il traffico aereo fuori dalla torre di controllo) rispetto a "head-down" (ovvero quando si ricercano informazioni di sorveglianza nei sistemi presenti presso la postazione di lavoro del controllore), anche in scenari operativi con bassa visibilità, e riduce il tempo di reazione in situazioni critiche o di allarme.

L'applicazione è stata, successivamente, testata presso la torre di controllo dell'aeroporto Marconi di Bologna, come indicato in [9]. L'impatto positivo dell'implementazione dell'HMI (interfaccia uomo-macchina) sui parametri delle prestazioni umane, evidenziato dal feedback degli ATCO, sottolinea il suo potenziale nel ridurre il carico di lavoro, mitigare il rischio di errori umani e migliorare fiducia, accettazione, soddisfazione lavorativa e percezione della sicurezza.

Tuttavia, per realizzarne appieno il potenziale, è necessario affrontare alcune limitazioni come quella legata alla progettazione e posizionamento delle etichette di tracciamento (label) che, sebbene migliorino l'identificazione spaziale dei velivoli, potrebbero incorrere in problemi legati ai possibili ritardi nell'elaborazione dei dati, che possono portare a rendere l'interazione meno fluida, a causa di buchi di segnale dovuti alla copertura dell'antenna e all'affollamento delle frequenze di ricezione/trasmissione (Figura 5).

Per questo, lo studio di questa tesi volge proprio a cercare di risolvere questi problemi attraverso il lavoro sulla predizione e interpolazione della posizione dell'aereo nell'intervallo di tempo tra la ricezione successiva dei messaggi di posizione, grazie all'implementazione di algoritmi che

permettano di predire la posizione del velivolo sfruttando le informazioni riguardanti la sua velocità e prua (heading).

4. Metodo

4.1 Strumenti utilizzati

Gli strumenti principali che hanno reso possibile lo sviluppo di questo progetto sono essenzialmente i seguenti: Unity, il suo relativo software di programmazione, C# e Visual Studio e Microsoft HoloLens.

4.1.1 Unity

Unity è una delle piattaforme di sviluppo di videogiochi e applicazioni 3D più popolari al mondo. È utilizzata per creare esperienze interattive in 2D, 3D, realtà virtuale (VR) e realtà aumentata (AR). È composta da un'interfaccia intuitiva che offre un ambiente di sviluppo visivo per progettare scene, gestire asset e controllare il comportamento degli oggetti e da un motore grafico avanzato che supporta rendering in tempo reale, illuminazione dinamica, e shader personalizzabili.

Include anche un "Asset Store", ovvero una libreria con migliaia di risorse (modelli 3D, texture, script) che gli sviluppatori possono usare per velocizzare il lavoro. Tra questi asset vi è anche il Mixed Reality Toolkit (MRTK), che è un set di strumenti open-source sviluppato da Microsoft per sviluppare applicazioni di realtà mista (*Mixed Reality* - MR). È progettato per semplificare lo sviluppo di esperienze immersive e interattive su dispositivi come il Microsoft HoloLens, visori VR e altre piattaforme compatibili con realtà mista.

Infine, Unity è una multiplatforma in grado di sviluppare un'applicazione una sola volta e distribuirla su molte piattaforme, come PC, console, dispositivi mobili, browser web e AR/VR e che sia, inoltre, un supporto per lo sviluppo in AR/VR, grazie alla sua integrazione con dispositivi come HoloLens, Oculus e ARKit/ARCore.

4.1.2 C# e Visual Studio

C# è il linguaggio di programmazione principale utilizzato in Unity, tramite l'ambiente di sviluppo "Visual Studio", per creare script che gestiscono il comportamento degli oggetti nel gioco o nell'applicazione. È un linguaggio moderno, orientato agli oggetti, sviluppato da Microsoft.

Le caratteristiche principali includono semplicità, grazie a una sintassi chiara e intuitiva, simile a quella di Java e C++. È un linguaggio orientato agli oggetti, il che significa che supporta concetti come ereditarietà, polimorfismo e incapsulamento, semplificando lo sviluppo di sistemi complessi. Inoltre, sfrutta l'esecuzione gestita, utilizzando il .NET Framework o Mono per gestire memoria e risorse, riducendo così errori comuni come i memory leak. Infine, è uno strumento potente e flessibile, adatto sia per script semplici, come il controllo dei movimenti degli oggetti, sia per la creazione di sistemi complessi, come l'intelligenza artificiale o la fisica.

Nello sviluppo di giochi e applicazioni con Unity, gli script in C# (Figura 6) contengono solitamente i metodi *Start* e *Update*, funzioni predefinite utilizzate per gestire il ciclo di vita di un oggetto all'interno di una scena. Sono strettamente legati al funzionamento del motore Unity e consentono di definire comportamenti che si verificano in momenti specifici del ciclo di vita del gioco o dell'applicazione.

Il metodo *Start* viene chiamato una sola volta all'inizio del ciclo di vita di un oggetto, subito dopo che l'oggetto è stato inizializzato e prima che inizi l'esecuzione del metodo *Update*. È utile per impostare inizializzazioni che richiedono che tutte le altre componenti dell'oggetto siano già pronte. Viene eseguito una volta per ogni oggetto, subito dopo che lo script associato all'oggetto è stato abilitato.

Il metodo *Update*, invece, viene chiamato ad ogni frame del gioco. Serve per gestire logiche che devono essere aggiornate continuamente, come il movimento di un personaggio, il controllo degli input dell'utente o la gestione di timer. Viene eseguito una volta per frame e il numero di chiamate a *Update* per secondo dipende dal frame rate (FPS) del gioco.

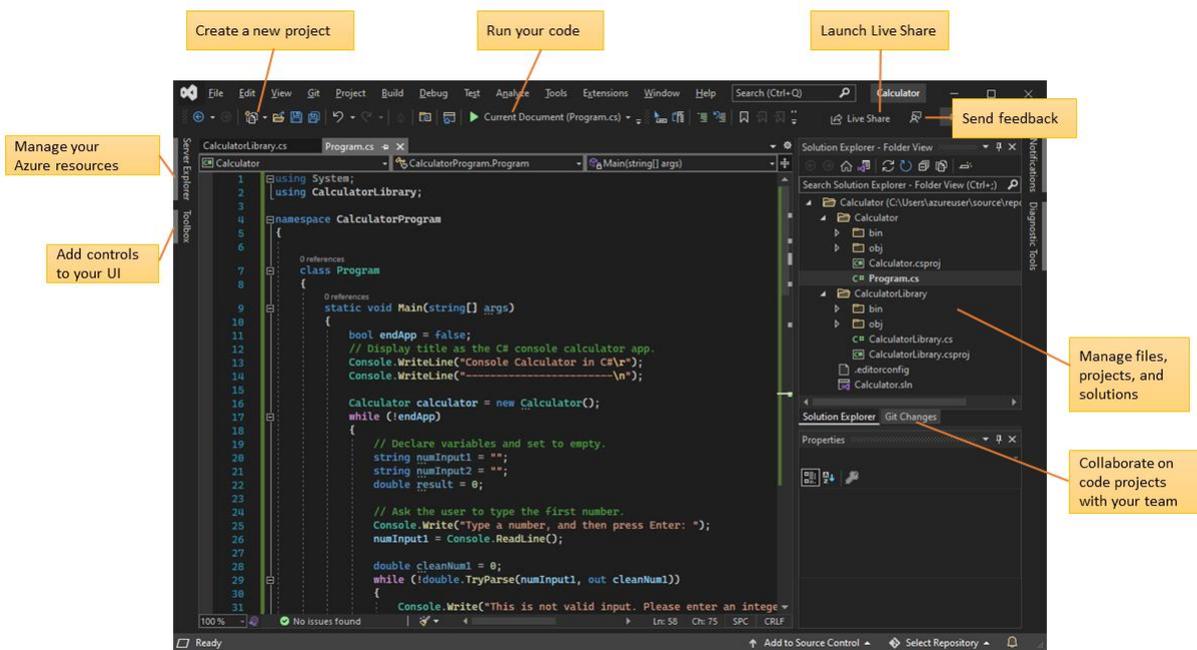


Figura 6. Rappresentazione panoramica per sviluppatori in C#

4.1.3 Microsoft HoloLens 2

Microsoft HoloLens 2 (Figura 7) è un visore di realtà mista (Mixed Reality) progettato da Microsoft. Combina elementi di realtà aumentata (AR) e realtà virtuale (VR) per sovrapporre oggetti digitali all'ambiente reale, consentendo agli utenti di interagire con contenuti virtuali in modo immersivo e intuitivo.

Le lenti di HoloLens2 sono trasparenti e vengono utilizzate per sovrapporre oggetti olografici al mondo fisico. Questi oggetti sono proiettati direttamente sulle lenti tramite un sistema di proiezione a laser.

Il visore è anche dotato di un sistema di visione stereoscopica, che utilizza due display per creare un effetto di profondità, simulando la percezione naturale della distanza e dando una sensazione di "3D" per gli ologrammi. Questo contribuisce a rendere l'esperienza molto più realistica rispetto alla semplice sovrapposizione di immagini 2D.

Inoltre, il dispositivo è equipaggiato con una vasta gamma di sensori per garantire l'interazione precisa con l'ambiente fisico e digitale.

Tra i principali sensori ci sono i sensori di profondità, utilizzati per mappare l'ambiente circostante e per rilevare la posizione degli oggetti e la distanza da essi. I sensori di movimento, ovvero un set di accelerometri, giroscopi e magnetometri che aiutano a tracciare il movimento della testa, permettendo un'accurata visualizzazione dell'ambiente in tempo reale. A questi si aggiungono i sensori di tracciamento per le mani basati su telecamere e algoritmi di computer vision e i sensori audio e microfoni utilizzati per rilevare il suono e la posizione dell'utente rispetto all'ambiente, migliorando l'interazione audio-ambientale.

Infine, sono presenti anche telecamere a colori e telecamere IR (infrarossi) che rilevano l'ambiente circostante e aiutano a tracciare la posizione della testa dell'utente e delle mani (per la manipolazione degli ologrammi) tramite il riconoscimento spaziale.

Per concludere, si può aggiungere che l'HoloLens è un dispositivo standalone, il che significa che non richiede cavi, computer esterni o smartphone per funzionare, infatti, può connettersi a reti Wi-Fi per accedere a risorse cloud, che consentono di elaborare dati o eseguire operazioni che richiedono una maggiore potenza di calcolo rispetto a quella che il dispositivo può gestire autonomamente. La connessione Wi-Fi è fondamentale anche per la collaborazione in tempo reale tra più utenti.



Figura 7. Rappresentazione di Microsoft HoloLens 2

Agli strumenti elencati in precedenza si aggiunge una applicazione che ha lo scopo di trasmettere i dati simulati con la giusta temporizzazione. Questa applicazione è fondamentale, perché permette di usare dati ADS-B di velivoli reali, precedentemente registrati, e poterli inviare ogni qual volta lo si desidera alla piattaforma AR, rispettando gli intervalli di ricezione originali dei dati per eseguire in maniera indipendente vari test in corso di sviluppo.

4.2 Algoritmi implementati per la predizione della posizione di un aereo

4.2.1 Traiettoria di un velivolo

La traiettoria di un velivolo rappresenta il percorso che un aereo segue durante il volo. Questo percorso è definito dalla combinazione di vari fattori. In primo luogo, la posizione del velivolo viene determinata dalle sue coordinate spaziali, che comprendono la latitudine e la longitudine per indicare la sua posizione orizzontale sulla superficie terrestre, e l'altitudine, che definisce la sua distanza

verticale dal livello del mare o da un altro riferimento. A questi si aggiungono la velocità del velivolo e la direzione in cui si sta muovendo, che influenzano il modo in cui la traiettoria si sviluppa nel tempo. Inoltre, fattori esterni come le condizioni meteorologiche, i venti e le turbolenze possono modificare la rotta del velivolo rispetto al piano di volo previsto. Durante il volo, anche le manovre e i controlli effettuati dal pilota o dai sistemi automatici, come cambiamenti di quota o virate, contribuiscono a modificare la traiettoria del velivolo.

Una volta che il concetto di traiettoria è stato definito nello spazio tridimensionale, si può estendere a un concetto 4D, che aggiunge una dimensione fondamentale: il tempo. Una traiettoria 4D non solo descrive dove si trova il velivolo in ogni momento (cioè latitudine, longitudine e altitudine), ma anche quando il velivolo raggiunge ciascun punto del suo percorso. In altre parole, la traiettoria 4D tiene conto del momento esatto in cui un velivolo si trova in una determinata posizione nello spazio, sincronizzando il movimento con il fattore temporale. Questo approccio consente una gestione del traffico aereo molto più precisa, poiché le rotte dei velivoli non solo sono posizionate nello spazio ma anche nel tempo, garantendo separazioni sicure e ottimizzando i percorsi per evitare conflitti e migliorare l'efficienza del volo.

Nel caso di studio di questa tesi si è ritenuto sufficiente utilizzare traiettorie in 2D, tenendo, però, sempre in considerazione la variabile temporale.

In Unity, l'integrazione della posizione di un oggetto utilizzando la velocità e la direzione è un processo relativamente semplice che può essere implementato tramite un algoritmo lineare. Ogni frame, si aggiorna la posizione dell'oggetto in base alla velocità e alla direzione, tenendo conto del framerate (la frequenza di aggiornamento dei frame). Il tempo tra i frame è spesso gestito dalla variabile "Time.deltaTime", che rappresenta il tempo in secondi tra l'ultimo frame e l'attuale.

Visti i dati che si avevano a disposizione, ricevuti dall'ADS-B, sono stati individuati due diversi possibili modi di calcolare il delta di posizione, e sono stati implementati entrambi per poterli confrontare.

4.3 Formulazione degli algoritmi di predizione della traiettoria e analisi dei risultati

Per monitorare virtualmente il movimento dei velivoli, calcolando anche il delta di posizione, il programma si basa su algoritmi, che, scritti con il linguaggio già citato in precedenza, C#, riescono a raccogliere i dati inviati dai vari velivoli, analizzarli e elaborarli.

Nello specifico, sono stati implementati due diversi algoritmi da mettere a confronto: il primo (che viene chiamato per comodità SP+H) calcola e aggiorna la posizione e la rotazione di un aereo in base alla velocità (speed) orizzontale e verticale, e alla prua del velivolo (heading) ed è stato progettato

per gestire sia aerei a terra che in volo. Mentre il secondo (chiamato POS) calcola una nuova posizione interpolata di un aeromobile basandosi di volta in volta sulle sue ultime due posizioni registrate. Entrambi sono stati scritti dentro la macrofunzione chiamata “*Update*” dello script che si occupa di gestire il movimento delle label. In tale funzione, quando la posizione GPS dell’aereo è stata aggiornata, vengono estratti i dati relativi alla latitudine, longitudine e altitudine dell’aereo. Questi dati vengono poi utilizzati per calcolare la posizione tridimensionale dell’aereo, la quale viene aggiunta a una lista contenente le posizioni precedenti e usata per posizionare la label identificativa del velivolo. Ogni volta che viene calcolata una nuova posizione, vi viene associato anche il tempo relativo all’acquisizione di tale posizione.

L’algoritmo SP+H inizia con un ciclo che scorre su ogni velivolo presente nella lista, controllando se per quel velivolo esistono già dati di posizione GPS e se tale posizione GPS non è ancora stata aggiornata nell’ultimo ciclo *Update*. Inoltre, vengono effettuati ulteriori controlli per verificare se il velivolo è rilevante per il tracciamento in AR (escludendo, ad esempio i velivoli in sorvolo ad alta quota) e se è già stata creato il relativo oggetto virtuale. Se tutte queste condizioni sono soddisfatte, il codice calcola la nuova posizione del velivolo in base alla sua velocità, direzione e stato (se è a terra o in volo).

Nel caso in cui il velivolo sia in volo, la posizione viene aggiornata tenendo conto della velocità tridimensionale (somma vettoriale di velocità rispetto al suolo e rateo di velocità verticale), mentre se il velivolo è a terra, la posizione viene modificata in base alla velocità orizzontale. Se nessuna delle condizioni precedenti è soddisfatta, la posizione viene impostata utilizzando un vettore dal valore nullo. Infine, la nuova posizione calcolata viene applicata al velivolo, permettendo la sua traslazione e rotazione continua all’interno dell’ambiente simulato.

Il secondo algoritmo (POS) presentato si occupa di calcolare e aggiornare la posizione basandosi sulle ultime due posizioni registrate. Se sono disponibili almeno due posizioni, il programma calcola la differenza tra l’ultima posizione e la penultima, ottenendo così un vettore che rappresenta lo spostamento dell’aereo tra due istanti temporali. Successivamente, viene calcolato l’intervallo di tempo tra le due registrazioni di posizione, che viene utilizzato per determinare la velocità (in forma vettoriale) con cui l’aereo si è spostato.

Per ottenere la nuova posizione, il codice applica un incremento basato sul tempo trascorso tra due frame successivi dell’applicazione – e quindi dall’ultima esecuzione del ciclo *Update* - e lo moltiplica per lo spostamento tra le due posizioni. L’aggiornamento della posizione del velivolo avviene aggiungendo questo valore di spostamento alla posizione precedente dell’aereo. In sintesi, questo

codice tiene traccia del movimento degli aerei nel tempo, aggiornando continuamente la loro posizione in base agli spostamenti precedenti e ai tempi intercorsi tra le misurazioni.

Entrambi gli algoritmi spiegati in precedenza, vengono analizzati tramite un codice relativo all'errore medio e allo scarto quadratico medio, che si occupa di verificare quanto le posizioni predette dagli algoritmi differiscano dalla posizione reale del velivolo, ogni qual volta una nuova posizione sia ricevuta tramite il sistema ADS-B. La logica inizia con la verifica se l'aereo in questione ha informazioni di posizione aggiornate dal sistema ADS-B nell'ultimo ciclo Update. Successivamente, se l'aereo ha almeno due posizioni registrate, vengono effettuati dei calcoli per analizzare il movimento dell'aereo rispetto alle posizioni previste. Viene calcolata la distanza percorsa tra la posizione corrente ottenuta dall'ADS-B e quella precedente, e viene calcolato l'errore tra la posizione attuale e quella prevista. Vengono anche calcolati degli indici di errore relativi alla velocità di spostamento, e i risultati vengono registrati in due liste separate. Inoltre, si calcolano la media e la deviazione standard (scarto quadratico medio) degli errori per avere una stima complessiva della precisione delle previsioni, calcolandoli ogni volta che si ha un nuovo punto e poi mediati per tutti i punti. L'errore medio è un valore normalizzato che indica quanto, proporzionalmente, la posizione stimata differisce dalla posizione osservata in relazione alla distanza percorsa (norma della differenza vettoriale tra la posizione predetta e quella reale, normalizzata sullo spostamento tra due posizioni). Un errore medio basso significa che le stime sono molto vicine alle osservazioni reali rispetto al movimento effettivo. Invece, la deviazione standard viene calcolata per valutare la variabilità degli errori relativi rispetto alla loro media. Serve a quantificare quanto, in media, gli errori relativi si discostano dalla media degli errori. Infine, il codice assegna la posizione corrente dell'aereo come la nuova posizione prevista, e la velocità di spostamento come la nuova velocità prevista, preparandosi per il ciclo di aggiornamenti successivo.

Nel contesto, le formule applicate per calcolare i due dati statistici sono le seguenti:

$$\text{Errore Medio (ME)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_i - y_i\|$$

1. Si calcola la differenza tra il valore vettoriale osservato (x_i) e quello predetto (y_i) per ogni campione.
2. Si calcola la norma di tale differenza (errore)
3. Si sommano tutte le differenze ottenute per ogni nuovo dato nel corso della simulazione.
4. Si divide il totale per il numero di campioni n (numero di posizioni ricevute dal sistema ADS-B).

$$\text{Scarto Quadratico medio (SQM)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

1. Si calcola la media dei valori osservati, y_i .
2. Si sottrae la media y_i da ciascun valore osservato x_i , e poi si eleva al quadrato la differenza.
3. Si sommano tutti i quadrati delle differenze.
4. Si divide la somma per n (o per $n-1$ se si sta calcolando la deviazione standard di un campione).
5. Infine, si estrae la radice quadrata del risultato per ottenere lo scarto quadratico medio.

4.4 Metodologia di ricerca

Una volta scritti e implementati gli algoritmi necessari, lo studio si è concentrato sulla validazione del sistema implementato attraverso la riproduzione simulata dei dati di diversi velivoli nello spazio aereo di Bologna, con lo scopo di analizzarne le varie fasi per verificarne sia il corretto movimento all'interno della simulazione sia la coerenza con ciò che accade nella realtà.

Per fare questa analisi, sono stati utilizzati dati raccolti in precedenza tramite un'antenna ADS-B riguardanti uno scenario di traffico reale presso l'aeroporto di Bologna. Questi dati sono quindi stati inviati, con una temporizzazione realistica, all'applicazione eseguita all'interno dell'ambiente di Unity, impostata sullo scenario dell'aeroporto di Bologna, e sono stati usati per riprodurre in maniera realistica varie fasi di volo di un aeromobile pertinenti lo spazio aereo aeroportuale. In particolare, i dati riprodotti hanno riguardato la fase di decollo, quella di atterraggio e quella di rullaggio a terra.

Per rendere la ricerca il più attendibile possibile, sono stati presi cinque aerei differenti per analizzare la fase di atterraggio e cinque per analizzare la fase di decollo. Inoltre, per sei di questi aerei, tre per fase, si è estrapolato dai dati la fase di rullaggio per analizzarla mentre la manovra viene eseguita sia con una traiettoria rettilinea sia in curva (in particolare in un tratto di raccordo tra la via di rullaggio principale e la pista dell'aeroporto). Per ciascuno di questi aeromobili la simulazione è stata riprodotta due volte per ottenere dei dati mediati, tenendo conto di una variazione aleatoria nel tempo di trasmissione dei dati esistente anche nel sistema simulato.

Lo scopo di questa analisi è verificare, durante ciascuna fase e per ciascun aereo gli errori medi e gli scarti quadratici medi per il confronto delle posizioni, ovvero analizzare quanto la posizione predetta dall'algoritmo si discosti dalla posizione dell'aeromobile nella realtà nel momento in cui un nuovo

dato di posizione viene ricevuto tramite il sistema ADS-B. Come secondo passo, si è quindi verificato quale dei due algoritmi (SP+H o POS) sia quello più efficace o quale simula in maniera più realistica la fase dell'aeromobile analizzata.

La ricerca consiste nell'analisi, eseguita all'interno dell'editor di Unity, dei dati simulati, preparati separando singoli aerei, e dei dati rappresentativi di singole fasi di volo. Successivamente vengono simulate una ad una le varie fasi degli aerei analizzandone il movimento all'interno del progetto. Infine, vengono raccolti i dati statistici ottenuti dalle simulazioni, visualizzati a schermo, per confrontarli e analizzarne il significato.

5. Risultati

In questo capitolo si analizzeranno gli algoritmi implementati, i dati ottenuti dal punto di vista qualitativo e quantitativo, e si discuteranno i risultati ottenuti da questa ricerca.

5.1 Presentazione dei risultati

La ricerca condotta ha analizzato diversi aspetti. Nel corso di questa analisi, vengono esaminati i risultati ottenuti dal confronto tra i due algoritmi, basandosi sui valori dell'errore medio (Mean Error) e differenza quadratica media (Mean Squared Difference) per entrambe le simulazioni. È importante sottolineare che i dati relativi al primo algoritmo saranno indicati come *Mean Error (SP+H)* e *Mean Squared Difference (SP+H)*, mentre i valori relativi al secondo algoritmo sono quelli sotto la dicitura *Mean Error (POS)* e *Mean Squared Difference Speed (POS)*. I risultati di tutte le simulazioni sono riportati in Tabella 3.

Ogni simulazione è stata ripetuta due volte usando gli stessi dati (1sim e 2sim), e in tutti i casi queste simulazioni hanno prodotto risultati molto simili. Questo va a confermare la precisione degli algoritmi implementati (ripetibilità dei risultati).

Durante la fase di atterraggio, emerge una chiara distinzione tra i due algoritmi in termini di precisione. I "mean error" sono generalmente più elevati con una media di circa 0.45 per **49D3CE** che sale a 2.08 per **300780**. In contrasto, il primo algoritmo mostra errori medi decisamente più bassi nella maggior parte dei casi, come nel caso di **49D3CE** con 0.18, che si alza fino a 0.36 per **300780**, suggerendo che quest'ultimo riesce a tracciare meglio la posizione durante l'atterraggio. Allo stesso modo, la differenza quadratica media tende ad essere più contenuta nel primo. Ad avvalere questa tesi, nel velivolo **49D3CE** i valori calcolati sono di 0.17 e 0.71 per entrambe le simulazioni nel primo algoritmo, mentre salgono rispettivamente a 1.74 e 3.93 nel secondo.

Nel decollo, si osserva una tendenza simile. Gli errori medi in posizione per l'algoritmo *POS* sono sempre più alti, con valori che vanno da 1.19 per **4CADC0** a 2.39 per **4D2237**, rispetto ai valori più bassi del primo che oscillano tra 0.28 e 0.54. Anche la differenza quadratica media per l'algoritmo

POS risulta più alta rispetto al primo, come nel caso di **4CADC0**, dove la deviazione standard è di 2.28 rispetto ai 0.27 del primo.

Ciò evidenzia una migliore accuratezza e minore dispersione dei risultati nell'algoritmo *SP+H*, che si comporta in modo più affidabile nel tracciare la posizione durante il decollo.

Per quanto riguarda la fase di taxi, la differenza tra i due algoritmi diventa più marcata.

Gli errori medi in posizione nel secondo mostrano valori piuttosto alti, come per **4D22FF** che arriva a 2.49, o **4D2368**, che tocca 2.79. Al contrario, nell'*SP+H*, gli errori medi in posizione sono generalmente più bassi, con **4D22FF** che registra 0.51 e **4D2368** 0.30, suggerendo che quest'ultimo riesce a seguire con maggiore precisione il movimento degli aerei durante il taxi. Anche la differenza quadratica media nel *POS* tende a essere più alta, con **4D22FF** che ha un valore di 3.03, mentre nell'*SP+H* il valore è di 0.22, un chiaro indicatore di una maggiore precisione e minore variabilità nelle stime. Gli scarti maggiori nel secondo algoritmo durante il taxi indicano che l'algoritmo fatica a mantenere una previsione costante in questa fase di movimento, forse a causa della maggiore sensibilità ai piccoli cambiamenti di traiettoria.

Nelle fasi di taxi in curva, invece, la situazione si inverte per alcuni velivoli, con il secondo algoritmo che tende a registrare errori più elevati rispetto al primo, ma la differenza diventa più complessa. Ad esempio, per **4D248C**, l'errore medio in posizione per *POS* è di 17.2, un valore molto alto, mentre nel primo si osserva un errore medio di 0.66, segnalando una performance nettamente migliore nel primo algoritmo. Anche la differenza quadratica media per *POS* in questa fase raggiunge valori estremamente elevati, come i 51.4 per **4D248C**, mentre in *SP+H* è di 0.43, confermando una stabilità notevole nelle previsioni della posizione da parte del primo algoritmo. Tuttavia, in alcuni casi, come per **4CADC0**, le differenze tra i due algoritmi sono meno marcate, con il secondo algoritmo che presenta valori leggermente superiori, ma non così estremi come in altri casi.

Tabella 3. *Rappresentazione dei dati statistici raccolti dalle simulazioni eseguite*

Aereo	Fase	Mean error (POS)	Mean error (SP+H)	Mean squared difference (POS)	Mean squared difference speed (SP+H)
		1sim/2sim	1sim/2sim	1sim/2sim	1sim/2sim

49D3CE	Atterraggio	0.45/0.7	0.18/0.62	1.74/3.93	0.17/0.71
4D22FF	Atterraggio	1.36/1.6	0.28/0.36	9.78/36.07	0.37/0.33
508405	Atterraggio	0.46/0.74	0.22/0.37	1.01/1.68	0.17/0.32
4D2368	Atterraggio	2.00/3.77	0.28/0.28	22.01/29.3	0.24/0.23
300780	Atterraggio	2.08/5.05	0.36/0.51	11.3/13.9	0.35/0.61
4CADC0	Decollo	1.19/1.58	0.35/0.3	2.28/2.71	0.27/0.19
4D248C	Decollo	1.29/1.78	0.39/0.47	2.84/2.21	0.34/0.29
4D2237	Decollo	1.27/2.39	0.39/0.45	3.03/4.3	0.31/0.35
398566	Decollo	1.19/2.16	0.46/0.51	2.27/4.72	0.33/0.41
4BB069	Decollo	1.44/2.31	0.37/0.54	3.21/5.29	0.38/0.47
49D3CE	Taxi	1.04/2.51	0.25/0.47	6.63/7.06	0.38/0.38
4D22FF	Taxi	1.33/2.49	0.51/0.37	3.03/5.49	0.22/0.32
4D2368	Taxi	2.00/2.79	0.30/0.25	1.40/2.16	0.26/0.20
4CADC0	Taxi	0.38/1.17	0.26/0.32	1.36/1.62	0.20/0.29
4D248C	Taxi	0.42/0.67	0.27/0.34	0.28/0.32	0.14/0.18
4D2237	Taxi	3.98/3.50	0.52/0.46	4.2/3.89	0.68/0.54
4D248C	Taxi in curva	12.5/17.2	0.66/0.74	44.6/51.4	0.38/0.43
4D2237	Taxi in curva	0.73/1.19	0.34/0.48	31.1/41.3	0.28/0.5
4CADC0	Taxi in curva	1.23/2.17	0.41/0.63	2.73/3.82	0.28/0.34

5.2 Discussione

Dai risultati ottenuti, si può osservare che:

- La fase più critica sembra essere quella del taxi in curva, con errori significativamente alti rispetto ad altre fasi. Questo potrebbe essere dovuto alla maggiore complessità del movimento (traiettorie curve, cambi di velocità).
- Gli errori relativi all'algoritmo $SP+H$ (sia l'errore medio che lo squarto quadratico medio) sono generalmente più contenuti rispetto a quelli relativi all'algoritmo POS .

Le fasi di decollo e atterraggio, in particolare, sembrano essere meno problematiche in termini di prestazioni algoritmiche. In queste fasi, sebbene gli errori esistano, sono di entità inferiore rispetto a quelli riscontrati durante il taxi e il taxi in curva. Entrambe le fasi di decollo e atterraggio, essendo più lineari e meno influenzate da improvvisi cambi di direzione o da traiettorie articolate, sembrano essere meglio gestite dagli algoritmi. Questo è evidenziato dai valori più bassi di errore medio e differenza quadratica media in queste fasi, dove l'algoritmo $SP+H$ in particolare mostra una significativa capacità di mantenere la precisione nella previsione della posizione e nel monitoraggio della velocità. Tuttavia, una problematica che può verificarsi è nel caso in cui si ha un rateo di velocità alto, quindi, in particolare, nella corsa di decollo o atterraggio nelle quali la velocità varia di molto in breve tempo.

Sicuramente, si può affermare che la parte più problematica in assoluto è quella di taxi in curva, non solo per la sua complessità, ma anche per la difficoltà che comporta nella simulazione del comportamento del velivolo. Durante il taxi, l'aeromobile si muove a bassa velocità e deve affrontare manovre non più rettilinee e questo può comportare dei problemi relativi all'aggiornamento della posizione del velivolo. Infatti, a bassa velocità, i movimenti di sterzata sono meno lineari e più complessi, e la risposta del velivolo diventa più sensibile. Gli algoritmi implementati, che non riescono a replicare correttamente la gestione della velocità e della traiettoria durante la curva, tendono a produrre risultati meno accurati.

Perciò si può dire che la fase di taxi in curva richiede una particolare precisione nell'orientamento e nel tracciamento della posizione dell'aereo, in quanto il velivolo deve seguire una serie di curve e manovre con angoli di sterzata che aumentano la difficoltà per gli algoritmi nel prevedere correttamente la sua posizione in tempo reale. In queste situazioni, il sistema di navigazione deve essere estremamente reattivo, in grado di gestire i cambiamenti repentini di direzione e l'instabilità dovuta alla geometria del percorso. Ciò richiede un algoritmo che non solo sia in grado di rilevare la posizione con precisione, ma che possa anche adattarsi rapidamente a variazioni di velocità e angolo senza introdurre significativi errori. Come si osserva nei dati, infatti, l'algoritmo basato sulle ultime posizioni, in particolare, mostra valori di errore medio e differenza quadratica media particolarmente alti durante questa fase. Per esempio, l'aereo con ICAO **4D248C** presenta un errore medio in posizione di 17.2 nel secondo algoritmo, rispetto al 0.66 del primo algoritmo, a testimonianza di una significativa difficoltà nel mantenere una traiettoria stabile durante le curve. In questo, occorre notare che, trattandosi di errori relativi, normalizzati sullo spostamento tra due posizioni GNSS successive, un valore per l'errore superiore a 1 indica che la differenza tra la posizione predetta e quella reale è

maggiore dello spostamento del velivolo nello stesso arco temporale, risultando se possibile in un peggioramento rispetto al mancato uso dell'algoritmo.

Anche la fase di taxi in generale mostra errori relativamente elevati, ma non con la stessa intensità del taxi in curva. Questa parte di simulazione, infatti, pur rappresentando una traiettoria generalmente più lineare, comprendeva comunque i dati riguardanti la percorrenza in curva, oltre a eventuali manovre effettuate sulla via di rullaggio principale.

Infine, si può notare che, durante il pushback, solo l'algoritmo *POS* è in grado di far muovere l'aereo in giusta direzione perché in *SP+H* la velocità è scalare e l'heading punta davanti al velivolo, perciò, il confronto tra i due algoritmi implementati potrebbe aiutare a identificare questa fase particolare, se associato anche alle informazioni sulla posizione del velivolo in piazzola e poi nel piazzale.

5.3 Sviluppi futuri per la predizione della traiettoria

L'analisi condotta evidenzia alcune limitazioni degli algoritmi implementati, specialmente nelle fasi più critiche come il taxi in curva, dove la complessità del movimento non lineare e i repentini cambi di direzione influiscono negativamente sulla precisione delle previsioni. Per affrontare queste sfide e migliorare le prestazioni dei sistemi di predizione della traiettoria, è necessario considerare approcci più sofisticati che integrino tecniche avanzate come l'interpolazione polinomiale unita alla tecnica del "map matching" o l'uso di filtri di Kalman.

Un primo sviluppo promettente riguarda l'utilizzo dell'interpolazione polinomiale per modellare la traiettoria degli aeromobili. L'interpolazione (ed estrapolazione) polinomiale consente di rappresentare i movimenti in modo più accurato, adattandosi alle variazioni dinamiche delle traiettorie. In particolare, l'impiego di polinomi di grado superiore può permettere di descrivere curve complesse, come quelle osservate durante il taxi in curva, con maggiore precisione. Questo approccio consente di costruire una funzione continua che passa per un set di punti noti (le posizioni registrate), riducendo gli errori introdotti dall'uso di semplici vettori o interpolazioni lineari.

Tuttavia, l'interpolazione polinomiale deve essere implementata con attenzione per evitare problemi di instabilità numerica o oscillazioni indesiderate, come quelle osservate nei polinomi di alto grado. Per mitigare questi rischi, si potrebbero utilizzare metodi come l'interpolazione "spline", che suddivide la traiettoria in segmenti più piccoli rappresentati da polinomi di basso grado, garantendo una maggiore stabilità e un adattamento locale migliore.

Un secondo strumento fondamentale per migliorare la predizione della traiettoria è rappresentato dai filtri di Kalman, un approccio probabilistico che consente di stimare lo stato di un sistema dinamico in presenza di incertezze e rumore nei dati. I filtri di Kalman sono particolarmente adatti a gestire le fluttuazioni dei dati ADS-B, dove i tempi di aggiornamento non sono sempre regolari e le misurazioni possono contenere errori. Questo metodo combina i dati osservati con un modello predittivo, aggiornando iterativamente le stime di posizione e velocità in base alle nuove osservazioni. La forza del filtro di Kalman risiede nella sua capacità di "apprendere" il comportamento del sistema nel tempo, fornendo previsioni più accurate anche in condizioni di rumore elevato o dati mancanti. Per esempio, durante il taxi in curva, il filtro potrebbe sfruttare i dati di posizione e velocità già disponibili per stimare il futuro percorso dell'aereo con maggiore affidabilità, riducendo significativamente gli errori di predizione.

Una combinazione di queste due tecniche potrebbe portare a risultati ancora più promettenti. L'interpolazione polinomiale può essere utilizzata per creare una traiettoria di riferimento continua e liscia, mentre i filtri di Kalman potrebbero integrare questa traiettoria con i dati in tempo reale, correggendo eventuali deviazioni dovute a rumore o variazioni improvvise.

6. Conclusioni

In questa ricerca sono stati sviluppati e analizzati algoritmi volti predire e simulare le traiettorie di velivoli in diverse fasi operative, con particolare attenzione alla precisione del calcolo delle traiettorie e alla gestione delle velocità. I risultati ottenuti evidenziano che le simulazioni sono state in grado di replicare in modo accurato il comportamento dei velivoli, soprattutto nelle fasi di decollo, atterraggio e taxi in rettilineo, con errori medi e scarti quadratici medi generalmente contenuti. Tuttavia, la fase di taxi in curva si è dimostrata particolarmente critica, registrando errori significativamente più elevati rispetto alle altre fasi. Questa difficoltà è riconducibile alla complessità intrinseca dei movimenti curvilinei, che richiedono un controllo preciso delle velocità e della traiettoria, non adeguatamente modellati dagli algoritmi implementati (che supponevano in prima approssimazione un moto rettilineo uniforme).

Un altro aspetto rilevante è la differenza tra l'accuratezza del calcolo delle posizioni e delle velocità. Gli errori relativi all'algoritmo che calcola e aggiorna la posizione e la rotazione di un aereo in base alla velocità orizzontale, velocità verticale e direzione sono risultati generalmente più bassi rispetto a quelli ottenuti dall'algoritmo che calcola una nuova posizione interpolata di un aeromobile basandosi di volta in volta sulle sue ultime due posizioni registrate, suggerendo che il primo aggiorna la traiettoria di un velivolo in maniera più accurata rispetto al secondo. Ciò mette in luce la necessità di migliorare i metodi di interpolazione e predizione per la posizione, specialmente nelle fasi di movimento lento e sterzate, dove il comportamento del velivolo è più complesso da modellare.

In sintesi, questa ricerca ha messo in evidenza l'efficacia degli algoritmi implementati per simulare il comportamento dei velivoli in condizioni operative standard, ma ha anche identificato aree di miglioramento, in particolare nella gestione del taxi in curva e nelle situazioni che richiedono un'elevata precisione nei calcoli delle traiettorie. Questi risultati offrono una solida base per sviluppi futuri, con l'obiettivo di affinare ulteriormente gli algoritmi e di migliorare la loro robustezza, così da garantire una simulazione ancora più accurata e realistica. Le potenziali applicazioni spaziano dalla pianificazione operativa degli aeroporti fino all'addestramento e alla validazione di sistemi di controllo del traffico aereo, confermando l'importanza e la rilevanza di questo studio nel campo dell'ingegneria aeronautica.

Biografia

- [1] Masotti, N., Bagassi, S., & De Crescenzo, F. (2016). Augmented reality for the control tower: The RETINA concept. In *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: Third International Conference, AVR 2016, Lecce, Italy, June 15-18, 2016. Proceedings, Part I 3* (pp. 444-452). Springer International Publishing.
- [2] Santarelli, R., Bagassi, S., Corsi, M., Teutsch, J., Lasheras, R. G., Carmona, M. A. A., & Groskreutz, A. R. (2022). Towards a digital control tower: the use of augmented reality tools to innovate interaction modes. *SESAR innovation days, 2022*.
- [3] Baek, K. Y., & Bang, H. C. (2012). ADS-B based trajectory prediction and conflict detection for air traffic management. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 13*(3), 377-385.
- [4] Yang, X., Sun, J., & Rajan, R. T. (2022, June). Aircraft Trajectory Prediction using ADS-B Data. In *Pre-Proceedings of the 2022 Symposium on Information Theory and Signal Processing in the Benelux* (p. 113).
- [5] Strohmeier, M., Schäfer, M., Lenders, V., & Martinovic, I. (2014). Realities and challenges of nextgen air traffic management: the case of ADS-B. *IEEE communications magazine, 52*(5), 111-118.
- [6] Sun, J. (2021). The 1090 megahertz riddle: a guide to decoding mode S and ADS-B signals. *TU Delft OPEN Publishing, 2*.
- [7] Nava-Gaxiola, C. A., & Barrado, C. (2016, September). Free route airspace and the need of new air traffic control tools. In *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-10). IEEE.
- [8] Bagassi, S., Corsi, M., De Crescenzo, F., Santarelli, R., Simonetti, A., Moens, L., & Terenzi, M. (2024). Virtual/augmented reality-based human-machine interface and interaction modes in airport control towers. *Scientific Reports, 14*(1), 13579.
- [9] Fadda, T. (2024). A roadmap for the implementation of augmented reality solutions for airport control towers in an operative environment. *Aerospace Science and Engineering: IV Aerospace PhD-Days, 173*.

- [10] Torrence, B., & Dressel, J. (2022, May). Critical review of extended reality applications in aviation. In *International Conference on Human-Computer Interaction* (pp. 270-288). Cham: Springer International Publishing.
- [11] Bagassi, S., Corsi, M., De Crescenzo, F., Moruzzi, M. C., & Santhosh, S. (2023). Maturity-based taxonomy of extended reality technologies in aircraft lifecycle. In *Aeronautics and Astronautics–AIDAA XXVII International Congress* (pp. 771-776).
- [12] Reisman, R., & Brown, D. (2006, September). Design of augmented reality tools for air traffic control towers. In *6th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO)* (p. 7713).
- [13] Safi, M., Chung, J., & Pradhan, P. (2019). Review of augmented reality in aerospace industry. *Aircraft engineering and aerospace technology*, 91(9), 1187-1194.
- [14] Fadda, T., Bagassi, S., & Corsi, M. (2023). ADS-B driven implementation of an augmented reality airport control tower platform. *Materials Research Proceedings*, 37, 767-770.
- [15] Zeng, W., Chu, X., Xu, Z., Liu, Y., & Quan, Z. (2022). Aircraft 4D trajectory prediction in civil aviation: A review. *Aerospace*, 9(2), 91.
- [16] Bagassi, S., De Crescenzo, F., Piastra, S., Persiani, C. A., Ellejmi, M., Groskreutz, A. R., & Higuera, J. (2020). Human-in-the-loop evaluation of an augmented reality based interface for the airport control tower. *Computers in Industry*, 123, 103291.
- [17] Bagassi, S., De Crescenzo, F., Lucchi, F., & Masotti, N. (2016). Augmented and virtual reality in the airport control tower. In *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences: DCC Daejeon, Korea: September 25-30, 2016: ICAS 2016* (Vol. 126186, pp. 1-8). International Council of the Aeronautical Sciences.
- [18] Bagassi, S., De Crescenzo, F., & Piastra, S. (2018). The use of synthetic vision tools in the control tower environment: the RETINA concept. In *31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2018: September 9-14, 2018*(Vol. 143115, pp. 1-8). International Council of the Aeronautical Sciences.