ISSN 2420-7888

Ratio Iuris

Autori: Ing. Gaetano Riccio[1], Ing. Mariangela Falco[2]

Applicazioni dell'Intelligenza Artificiale in Ambito Aerospaziale: Innovazioni, Tecnologie Abilitanti e Strategie per la Transizione Sicura

Abstract (IT)

La presente trattazione scientifica analizza l'integrazione delle tecnologie basate sull'intelligenza artificiale nel settore aerospaziale, evidenziando le innovazioni metodologiche e le barriere che ne ostacolano l'adozione nei sistemi critici per la sicurezza di volo. L'articolo esamina la letteratura accademica recente nei settori della guida, navigazione e controllo, della manutenzione predittiva e della fluidodinamica computazionale. Attraverso l'identificazione dei principali gap regolatori e metodologici, viene formalizzato il problema di ricerca relativo alla riconciliazione tra l'apprendimento statistico non deterministico e i requisiti di certificazione deterministica aeronautica. Vengono successivamente presentate soluzioni innovative quali l'intelligenza artificiale neurosimbolica, le metodologie di verifica formale e i sistemi di calcolo ad alte prestazioni collocati ai margini operativi. La trattazione delinea un percorso di transizione strutturato, supportato da quadri di sviluppo automatizzati e monitoraggio continuo in servizio.

Parole chiave: Intelligenza artificiale aerospaziale, Certificazione avionica, Verifica formale, Sistemi neurosimbolici, Edge computing spaziale.

Abstract (EN)

This scientific paper analyzes the integration of AI-based technologies in the aerospace sector, highlighting methodological innovations and the barriers hindering their adoption in safety-critical systems. The article reviews recent academic literature in the fields of guidance, navigation, and control, predictive maintenance, and computational fluid dynamics. By identifying key regulatory and methodological gaps, the research problem of reconciling nondeterministic statistical learning with deterministic aeronautical certification requirements is formalized. Innovative solutions such as neurosymbolic AI, formal verification methodologies, and high-performance computing systems at the operational edge are then presented. The paper outlines a structured transition path, supported by automated development frameworks and continuous in-service monitoring.

[1] Docente a contratto presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II corso di Sistemi di Elaborazione delle Informazioni e presso l'Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli corso Sistemi informativi per la P.A, Dirigente Area Informatica della Giunta della Regione Campania, Direttore del Dipartimento Intelligenza Artificiale di supporto alle Pubbliche Amministrazioni dell'Ente Nazionale Intelligenza Artificiale (ENIA), Componente

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

esterno del Comitato d'indirizzo dei Corsi di Studio dell'Area Economica del Dipartimento di Economia, Management e Metodi Quantitativi

[2] Funzionario Informatico della Giunta della Regione Campania

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

ISSN 2420-7888

Keywords: Aerospace AI, Avionics certification, Formal verification, Neurosymbolic systems, Space edge computing.

ISSN 2420-7888

Sommario

1. Analisi della letteratura accademica, 2. Gap della letteratura, 3. Problema di ricerca, 4. Soluzioni al problema e tecnologie per la transizione, 5. Conclusioni

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

1. Analisi della letteratura accademica

L'evoluzione tecnologica recente evidenzia un interesse preminente verso l'integrazione di sistemi intelligenti all'interno del comparto aerospaziale. Questa transizione risponde alla necessità di aumentare l'autonomia delle piattaforme aeree e ottimizzare i complessi processi di progettazione, gestione e manutenzione. La letteratura scientifica recente affronta l'applicazione di metodologie ad apprendimento profondo attraverso diverse linee di ricerca specialistiche.

1.1. Sistemi di Guida, Navigazione e Controllo (GNC) e Ottimizzazione delle Traiettorie

La sintesi delle leggi di guida e di controllo nei vettori spaziali e nei velivoli si affida tradizionalmente a formulazioni analitiche rigorose. Tuttavia, la presenza di forti non linearità e di incertezze ambientali spinge la ricerca verso soluzioni computazionali adattive. In questo contesto, l'impiego delle reti neurali informate sulla fisica permette di superare i limiti dei solutori numerici classici. Tali strutture integrano le equazioni differenziali del moto all'interno dei processi di ottimizzazione dei parametri di rete.

Per la pianificazione di traiettorie a consumo ottimale di propellente si utilizzano le reti neurali di Pontryagin. Questa variante delle reti informate sulla fisica risolve il problema dei valori al contorno a due punti derivato dal principio del minimo di Pontryagin. L'approssimazione degli stati e dei costati avviene mediante espressioni vincolate che rispettano analiticamente le condizioni iniziali e finali. L'algoritmo di addestramento si basa su macchine ad apprendimento estremo. Questo schema permette di determinare in modo automatico il numero e la tempistica dei cambi di direzione della spinta propulsiva senza richiedere ipotesi preliminari. Le applicazioni pratiche includono i trasferimenti interplanetari Terra-Marte e i profili di discesa controllata sulla superficie marziana.

La generazione di traiettorie ottimizzate viene accelerata anche attraverso tecniche di ottimizzazione convessa sequenziale e programmazione convessa a perdita zero. L'integrazione di questi metodi matematici all'interno di schemi di controllo predittivo del modello garantisce la fattibilità in tempo reale delle manovre di guida. Queste soluzioni trovano applicazione nelle manovre di rendezvous orbitale, nel rientro controllato di lanciatori riutilizzabili e nell'atterraggio di precisione su corpi celesti.

1.2. Navigazione Autonoma, UAS e Sciami di Velivoli

La navigazione autonoma in scenari dinamici e parzialmente osservabili richiede capacità decisionali rapide. Gli algoritmi di apprendimento per rinforzo profondo mostrano un'efficacia significativa nella pianificazione dei percorsi. Lo schema Advantage Actor-Critic viene integrato con tecniche di sintonizzazione automatica degli iperparametri basate sul framework Optuna. Questo connubio migliora la stabilità dell'addestramento e riduce i tempi di convergenza. Le simulazioni software-in-the-loop condotte in ambienti tridimensionali realistici confermano incrementi rilevanti nell'efficienza delle traiettorie e una drastica riduzione degli impatti accidentali.

Per i velivoli di grandi dimensioni caratterizzati da elevata inerzia si adottano pianificazioni strutturate in due fasi. La ricerca del percorso globale viene inizialmente affidata all'algoritmo Batch Informed Trees. Successivamente un modulo di ottimizzazione locale genera una traiettoria fluida rispettando i vincoli cinematici del mezzo aereo tramite spline geometriche. Questa metodologia garantisce l'incolumità del volo anche in presenza di ostacoli imprevisti ad alta dinamica.

Nel segmento dei velivoli su scala nanometrica la pianificazione deve confrontarsi con severe limitazioni fisiche di massa e potenza. I processori di bordo operano con budget energetici inferiori a cento milliwatt. Questo impone lo sviluppo di architetture neurali estremamente efficienti per la stima della posa e l'evitamento

degli ostacoli.

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

L'evoluzione verso comportamenti di tipo agentico permette ai droni di collaborare in modo coordinato. Questi apparati combinano memoria interna, percezione diffusa e pianificazione distribuita per risolvere compiti complessi in modo cooperativo. Un'applicazione di rilievo riguarda la gestione degli incendi boschivi. Le unità aeree autonome monitorano il territorio nella fase preventiva, tracciano il fronte del fuoco durante l'evento attivo e stimano i danni strutturali nel periodo successivo al disastro. Il coordinamento di sciami di velivoli viene formalizzato matematicamente attraverso varianti del problema del commesso viaggiatore multiplo. Questo modello distribuisce i compiti operativi ottimizzando l'autonomia energetica globale della flotta.

1.3. Modellazione Fisica, Fluidodinamica Computazionale e Analisi Strutturale

La fluidodinamica computazionale rappresenta uno strumento essenziale per la progettazione aerodinamica. I metodi tradizionali richiedono discretizzazioni di griglia estremamente onerose sotto il profilo del calcolo numerico. Le reti neurali informate sulla fisica propongono un approccio privo di griglia per la risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes. Tuttavia, in presenza di flussi caratterizzati da elevati numeri di Reynolds, tali modelli mostrano instabilità numerica.

Per superare questa barriera, la ricerca integra i principi della teoria cinetica mesoscopica nei modelli di apprendimento. L'equazione del metodo Lattice Boltzmann a rilassamento multiplo viene inserita come vincolo fisico nella funzione di perdita. L'architettura duale prevede separatamente le variabili macroscopiche conservate e le funzioni di distribuzione fuori equilibrio. Questo schema stabilizza l'addestramento e garantisce precisione sia nei problemi diretti sia in quelli inversi.

La modellazione della combustione pulita nei sistemi propulsivi aeronautici affronta la complessità delle reazioni chimiche e della turbolenza. I modelli di rete neurale informata sulla fisica catturano la velocità di propagazione della fiamma e i limiti di estinzione locale in condizioni di scarsità di dati sperimentali. Questo favorisce lo sviluppo di camere di combustione a basse emissioni per motori di nuova generazione. Inoltre, per supportare i flussi di lavoro di ottimizzazione multidisciplinare del design aeronautico, si impiegano dati a bassa fedeltà per guidare la rete verso soluzioni fisicamente ammissibili, riducendo l'onere computazionale globale.

Nell'ambito dell'integrità strutturale si rileva l'utilizzo di reti neurali ricorrenti per la stima del danneggiamento da fatica. Il modello integra la formulazione differenziale della crescita delle cricche di Paris-Erdogan. L'integrazione numerica dell'equazione differenziale viene mappata all'interno delle connessioni della rete ricorrente. Questo schema ibrido combina la conoscenza teorica dei meccanismi di frattura con i dati storici di carico rilevati in volo, permettendo la prognosi dello stato di salute strutturale delle flotte aeree.

1.4. Diagnostica e Manutenzione Predittiva (CBM & MRO)

La transizione verso strategie di manutenzione basate sullo stato effettivo dei componenti rappresenta un pilastro per la riduzione dei costi operativi delle compagnie aeree. La disponibilità di grandi flussi di dati generati dai sensori di bordo alimenta algoritmi di classificazione e regressione per il monitoraggio della salute dei sistemi avionici. I componenti monitorati includono i propulsori turbofan, gli attuatori di volo, le unità di potenza ausiliaria e i raddrizzatori elettrici.

L'architettura di acquisizione dati FOMAX installata sui velivoli di linea Airbus A330 costituisce un esempio di riferimento nell'elaborazione di messaggi diagnostici. Il flusso informativo viene processato in tempo reale mediante una catena software scalabile basata sullo stack ELK. L'identificazione delle anomalie avviene tramite un modello non supervisionato basato su foresta isolata. Successivamente, un classificatore a foresta casuale assegna un punteggio di rischio, mentre una rete neurale ricorrente con meccanismo di attenzione predice l'insorgenza del guasto. Questo approccio garantisce un preavviso medio di oltre otto ore, consentendo

la pianificazione degli interventi manutentivi ed evitando interruzioni del servizio.

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

Nelle piattaforme ad ala rotante, l'analisi delle vibrazioni delle pale del rotore principale consente di individuare precocemente difetti strutturali. Le oscillazioni asimmetriche tra la pala avanzante e quella recedente generano carichi strutturali complessi che devono essere costantemente bilanciati. I dati provenienti da centinaia di sensori vibrazionali vengono elaborati da reti neurali convoluzionali per classificare lo stato di integrità del rotore.

La misurazione dei carichi strutturali effettivi viene eseguita anche attraverso sensori di deformazione installati sul carrello di atterraggio dei velivoli. I segnali analogici convertiti in storie di sollecitazione permettono di calcolare la fatica accumulata in base all'effettivo profilo di impiego del mezzo. Questo approccio supera i margini conservativi dei modelli statistici tradizionali, estendendo in sicurezza la vita utile operativa dei componenti.

La tabella seguente riassume le caratteristiche principali delle applicazioni di manutenzione predittiva descritte nella letteratura accademica aerospaziale.

Tabella 1 - Applicazioni di manutenzione predittiva

Componente Monitorato	**Piattaforma e Sensori**	**Modelli Computazionali**	**Prestazioni Rilevate**	**Impatto Operativo ed Economico**
Sistemi di Bordo Generali	Airbus A330, Acquisizione FOMAX	Stack ELK, Isolation Forest, Random Forest, LSTM con attenzione	AUC di 0.84, preavviso medio di 8.2 ore	Risparmio stimato di 1.2 milioni di dollari annui per velivolo
Pale del Rotore Principale	Elicotteri, 500 Sensori di Vibrazione	Rete Convoluzionale Temporale (CNN)	Accuratezza del 97%, Precisione del 98%	Prevenzione di cedimenti catastrofici in volo
Carrello di Atterraggio	Velivoli Militari, Strain Gauges	Reti Neurali per Storie di Sollecitazione	Estensione della stima di vita utile strutturale	Riduzione delle sostituzioni premature di componenti sani
Sistemi Avionici ed Engine	Piattaforme Generiche, 10.000 Canali Sensoriali	Random Forest, SVM, Reti Neurali	Accuratezza del 92.5%, Richiamo del 89.3%	Pianificazione efficiente degli interventi di riparazione

1. Gap della letteratura

Nonostante i risultati incoraggianti ottenuti in ambiente simulato, il trasferimento di queste metodologie computazionali all'interno di sistemi reali di sicurezza incontra severi ostacoli. La transizione viene rallentata da profonde discrepanze tra la natura degli algoritmi di apprendimento e i requisiti di affidabilità aeronautica.

ISSN 2420-7888

1.1. Incompatibilità degli Standard Deterministici di Sicurezza

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

I processi di certificazione e omologazione del software di volo si fondano su criteri di rigoroso determinismo. Le linee guida classiche della DO-178C impongono requisiti stringenti di tracciabilità logica. Ogni singola funzione implementata nel codice sorgente deve corrispondere in modo lineare a un requisito di sistema predefinito. Questo assicura che il comportamento dell'apparato sia interamente prevedibile in ogni singola condizione operativa.

I modelli basati sull'apprendimento profondo violano questo paradigma fondamentale. Il loro comportamento non viene definito mediante istruzioni logiche esplicite scritte da un programmatore umano. Esso emerge dall'ottimizzazione statistica di milioni di pesi sinaptici durante l'addestramento su dataset storici.

Di conseguenza, le metriche tradizionali di copertura del codice perdono validità. Non è possibile verificare in modo esaustivo il flusso logico interno attraverso prove dinamiche tradizionali. Questa opacità impedisce agli ingegneri di compilare safety case strutturati accettabili per le autorità di regolamentazione aeronautica.

1.2. Sfide nella Qualifica degli Strumenti e Definizione dei Confini Operativi

Un ulteriore divario riguarda il processo di qualifica degli strumenti di sviluppo secondo le prescrizioni della norma DO-330. Nello sviluppo avionico classico gli strumenti software di compilazione e verifica sono limitati e facilmente validabili. Al contrario, la catena di creazione di una rete neurale prevede l'impiego di una complessa suite di software di gestione dei dati, ottimizzatori matematici e convertitori di formato. La qualifica di ciascuno di questi elementi risulta complessa. La mancanza di uno strumento di verifica qualificato per il controllo dell'output rende necessario il controllo manuale di volumi di dati imponenti, inficiando i vantaggi dell'automazione.

Sussiste inoltre una marcata assenza di metodologie standardizzate per definire in modo quantitativo la completezza di un dataset. Non esistono criteri concordati per stabilire se un insieme di dati copra in modo esaustivo il Dominio di Progettazione Operativa, specialmente in condizioni ambientali rare o di emergenza. Questa carenza impedisce di dimostrare la capacità di generalizzazione del modello a scenari non incontrati durante la fase di sviluppo, introducendo rischi di comportamenti imprevisti in volo.

1.3. Il Paradosso della Spiegabilità e Vulnerabilità agli Attacchi Informatici

Sebbene lo sviluppo di tecniche di intelligenza artificiale spiegabile cerchi di rendere trasparenti i modelli a scatola nera, la letteratura evidenzia un limite strutturale. Le spiegazioni fornite dalle metodologie correnti si basano su calcoli matematici post-hoc. Queste rappresentazioni offrono una visione semplificata che spesso non corrisponde alla reale logica interna del modello di decisione. Tale divario può indurre in errore l'operatore umano, generando una falsa percezione di fiducia nei confronti di risposte errate.

Inoltre, i sistemi di spiegazione aumentano la superficie di attacco informatico. Gli attacchi di manipolazione antagonistica possono alterare le spiegazioni visive fornite all'utente con percentuali di successo superiori al novanta percento, mantenendo inalterata la precisione globale del modello principale. Questa vulnerabilità permette a soggetti esterni di mascherare comportamenti anomali del sistema intelligente, ingannando i piloti o i controllori del traffico aereo.

Infine, l'adeguamento dei sistemi storici aziendali alle nuove direttive di trasparenza comporta costi imponenti per i grandi costruttori aeronautici, mentre le startup agili possono beneficiare di una maggiore flessibilità normativa per accelerare l'integrazione di queste soluzioni.

La tabella seguente evidenzia le principali limitazioni degli standard di certificazione correnti rispetto ai requisiti dei modelli di apprendimento automatico.

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

Tabella 2 - limitazioni degli standard di certificazione

Standard di Riferimento	Ambito di Certificazione	Requisito Fondamentale	Limitazione Applicativa con Modelli ML
ARP4754B	Sviluppo di Sistemi Complessi	Definizione strutturata dei requisiti funzionali	Difficoltà nella specifica esaustiva dei confini del dominio operativo
ARP4761A	Analisi di Sicurezza e Rischi	Calcolo probabilistico dei guasti hardware	Inapplicabilità delle analisi probabilistiche ad errori logici software
DO-178C	Software di Volo	Tracciabilità lineare e copertura strutturale del codice	Impossibilità di mappare i requisiti sui singoli pesi sinaptici
DO-254	Hardware Elettronico Complesso	Verifica deterministica dei circuiti logici	Inadeguatezza nella validazione di processori paralleli GPU
DO-330	Qualifica degli Strumenti Software	Ripetibilità e prevedibilità dell'output degli strumenti	Complessità eccessiva della catena di strumenti di apprendimento

2. Problema di ricerca

La convergenza delle sfide esaminate definisce un problema di ricerca chiaro:

La mancanza di formulazioni teoriche e pratiche che consentano di riconciliare la natura statistica, probabilistica e non deterministica dei modelli ad apprendimento profondo con i requisiti di verificabilità matematica, stabilità comportamentale e tracciabilità continua imposti dagli standard di aeronavigabilità per i sistemi critici di volo.

Questo problema si manifesta con forza nel fenomeno descritto come la cautela nell'adozione dell'intelligenza artificiale critica. Le aziende del settore investono risorse nello studio della sicurezza dei modelli ma evitano l'installazione di moduli intelligenti all'interno di funzioni primarie di volo.

Questa riluttanza deriva dal fatto che i difetti strutturali del software classico presentano un costo di risoluzione che aumenta in modo esponenziale durante le diverse fasi del ciclo di vita del prodotto. Un errore corretto nella fase dei requisiti comporta costi minimi, mentre la sua risoluzione dopo la consegna operativa può richiedere investimenti cento volte superiori. Nel caso di sistemi basati sui dati, la correzione di comportamenti anomali emersi in servizio risulta complessa, poiché richiede nuove sessioni di addestramento e validazione globale.

Sotto il profilo operativo aeronautico, la valutazione basata su metriche medie si rivela insufficiente. Un classificatore di bordo che mostra un'accuratezza complessiva molto elevata può comunque presentare modalità di guasto pericolose. Le anomalie funzionali si manifestano in diverse forme :

- Guasto passivo: il sistema smette di rilevare gli elementi esterni e interrompe l'esecuzione delle funzioni di guida.
- Rilevamento errato: il classificatore interpreta in modo scorretto gli elementi ambientali, generando

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

comandi potenzialmente distruttivi per la sicurezza del mezzo.

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

- Perdita di controllo: la piattaforma esegue in modo erratico azioni non codificate, provocando deviazioni irreparabili dalla traiettoria sicura.

La ricerca deve quindi sviluppare strumenti in grado di garantire l'assoluta assenza di queste condizioni di guasto pericolose, fornendo prove matematiche stabili del comportamento del software in ogni punto dello spazio degli stati operativi.

3. Soluzioni al problema e tecnologie per la transizione

Per superare le barriere individuate e abilitare l'omologazione di funzioni di volo intelligenti, la comunità scientifica propone una serie di innovazioni tecnologiche e metodologiche. Queste soluzioni costituiscono l'infrastruttura di transizione per il settore aerospaziale.

3.1. Architetture Neurosimboliche per il Controllo e l'Addestramento

L'intelligenza artificiale neurosimbolica combina la capacità di apprendimento tipica delle reti neurali con il rigore logico dei sistemi basati su regole simboliche. Questo approccio ibrido integra la conoscenza di esperti all'interno di modelli di calcolo complessi, riducendo la necessità di grandi volumi di dati di addestramento.

Nel settore della mobilità aerea avanzata e dei sistemi di trasporto urbano autonomi, questa architettura permette di far rispettare in modo rigido le normative dello spazio aereo e i limiti fisici delle piattaforme di volo. Mentre la componente neurale analizza i flussi dei sensori di bordo, la componente simbolica verifica che le decisioni di guida non violino le distanze di sicurezza dagli ostacoli o i vincoli di pianificazione.

L'applicazione si estende alla gestione energetica dei velivoli elettrici a decollo verticale. Le limitazioni tecnologiche delle batterie agli ioni di litio richiedono strategie di controllo precise per prevenire surriscaldamenti durante le fasi critiche del volo. La componente simbolica esclude in tempo reale i comandi di spinta che porterebbero le celle termiche oltre le soglie di sicurezza stabilite dai costruttori.

Un ulteriore sviluppo riguarda la digitalizzazione dei processi di manutenzione e revisione aeronautica. I manuali tecnici di velivoli storici, come il Boeing 737, vengono convertiti in strutture di dati interpretabili dalle macchine. Il sistema neurosimbolico traduce le richieste degli operatori in linguaggio naturale in programmi simbolici. Questo permette di eseguire procedure di smontaggio virtuale sui gemelli digitali con livelli di accuratezza elevati.

L'architettura neurosimbolica garantisce una trasparenza totale, poiché consente di ispezionare singolarmente ogni fase logica del ragionamento. Inoltre, l'introduzione di aggiornamenti nei manuali tecnici non richiede il riaddestramento del sistema, essendo sufficiente modificare la base di conoscenza simbolica.

Per agevolare le valutazioni di sicurezza, le reti auto-imponenti mappano le prestazioni logiche ai corrispondenti livelli di integrità di sicurezza previsti dalle normative industriali.

3.2. Metodi di Verifica Formale e Raggiungibilità

La verifica formale sostituisce i test empirici con dimostrazioni matematiche di conformità ai requisiti di sicurezza. Essa assicura che il comportamento di un sistema cyber-fisico intelligente rimanga sicuro all'interno dello spazio operativo definito.

Un esempio di riferimento è la validazione del sistema di prevenzione delle collisioni ACAS Xu per droni commerciali. L'impiego della libreria di verifica VNN-LIB e di risolutori avanzati permette di analizzare la robustezza globale delle reti neurali compresse utilizzate per la generazione dei comandi di deviazione. Attraverso l'analisi di raggiungibilità basata su insiemi a stella si dimostra la stabilità del comportamento a

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

ciclo chiuso del velivolo. Questo metodo analizza le interazioni tra la dinamica del volo e i cambi di stato del

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

controllo, garantendo il mantenimento delle distanze di separazione dall'intruso in presenza di incertezze sulla posizione di partenza.

Per i modelli di apprendimento per rinforzo profondo, il framework ProVe risolve il problema delle sovrapposizioni delle uscite decisionali. I risolutori tradizionali falliscono quando gli intervalli calcolati per le diverse opzioni di controllo si sovrappongono, non riuscendo a prevedere quale comando verrà effettivamente eseguito dalla rete. ProVe applica una bisezione ricorsiva dello spazio degli ingressi, riducendo l'errore associato alle approssimazioni intervallari. La propagazione parallela dei limiti sui processori grafici permette di calcolare il tasso di violazione delle proprietà di sicurezza in tempi ridotti.

Inoltre, per ridurre i requisiti di memoria ed energia sui computer di bordo, i metodi di verifica vengono estesi a modelli di rete neurale binarizzata tramite estensioni del framework Marabou. Lo sviluppo di queste soluzioni viene supportato da progetti di ricerca strutturati, come l'iniziativa Venus, focalizzata sulla verifica formale di architetture intelligenti per sistemi critici.

La tabella seguente illustra le principali metodologie di verifica formale applicate ai sistemi aeronautici intelligenti.

Tabella 3 - Metodologie di verifica formale

Strumento di Verifica	**Modello di Rete**	**Proprietà Analizzate**	**Approccio Matematico**	**Risultato Principale**
Star-set Reachability	ACAS Xu Compresso	Separazione di sicurezza tra velivoli	Analisi di raggiungibilità geometrica a ciclo chiuso	Garanzia di assenza di collisioni in scenari complessi
ProVe (Property Verifier)	Apprendimento per Rinforzo Profondo	Coerenza decisionale ed evitamento pericoli	Algebra degli intervalli con bisezione parallela	Calcolo esatto del tasso di violazione in servizio
Marabou Extension	Reti Neurali Binarizzate	Robustezza locale e correttezza logica	Soddisfabilità proposizionale modulare (SMT)	Ottimizzazione energetica per hardware avionico
Venus Toolkit	Cyber-Physical Systems (LE-CPS)	Proprietà temporali e strategiche complesse	Analisi formale di sistemi ad anello chiuso	Piattaforma integrata per uso industriale aeronautico

3.3. Edge Computing ad Alte Prestazioni per il Volo Autonomo

L'elaborazione locale dei flussi informativi ad alta frequenza generati dai sensori di bordo risulta fondamentale per garantire tempi di reazione minimi. L'edge computing evita il downlink di imponenti masse di dati grezzi verso i centri di controllo di terra, superando i vincoli di larghezza di banda delle comunicazioni satellitari.

Il computer di bordo THOR rappresenta un esempio di hardware ad alta affidabilità per il calcolo tattico ai

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

ISSN 2420-7888

margini operativi. Basato su un'architettura aperta allineata agli standard SOSA, CMOSS e VITA, THOR

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

supporta moduli di elaborazione basati su processori Intel, ARM e acceleratori grafici NVIDIA. Lo chassis è progettato per resistere a condizioni ambientali ostili, rispettando le normative militari per shock, vibrazioni ed escursioni termiche.

L'integrazione di reti switched Ethernet con supporto per protocolli sensibili al tempo assicura il transito dei dati a bassa latenza. Questa infrastruttura hardware supporta l'esecuzione in tempo reale di funzioni di fusione sensoriale, guerra elettronica e navigazione autonoma in aree prive di segnale GPS.

Nello spazio, il veicolo di trasferimento orbitale Elytra dimostra l'efficacia del calcolo ai margini per le missioni in orbita. Elytra ospita moduli software intelligenti sviluppati da Klepsydra Technologies. Gli algoritmi elaborano i dati di telemetria e le immagini ottiche direttamente a bordo del satellite. Questo consente di eseguire manovre autonome di guida, navigazione e controllo, oltre ad attività di monitoraggio dello spazio circostante e di rilevamento di anomalie strutturali.

La connettività viene potenziata dall'integrazione con reti mobili 5G. Queste reti abilitano il coordinamento tattico immediato tra piattaforme aeree e unità di terra all'interno di schemi operativi distribuiti. Infine, microprocessori industriali dedicati supportano la definizione di corridoi di volo protetti per droni civili attraverso firme elettroniche verificate

4. Conclusioni

La transizione verso l'impiego sicuro di modelli intelligenti richiede un'evoluzione dei processi di sviluppo e monitoraggio continuo. Le metodologie di MLOps garantiscono la tracciabilità e la ripetibilità dell'intero ciclo di vita del modello, dalla raccolta dei dati all'esercizio in volo.

Il modello di garanzia a "W" proposto dall'EASA si affianca al classico schema a "V" dello sviluppo avionico. Esso introduce attività specifiche dedicate alla strutturazione dei dataset, all'addestramento supervisionato e alla validazione formale della robustezza.

Questo approccio richiede la definizione rigorosa del Dominio di Progettazione Operativa e l'integrazione di sistemi per il rilevamento della deriva dei dati in tempo reale. Se le condizioni di volo deviano dal profilo stabilito durante lo sviluppo, il sistema attiva allarmi per consentire la transizione verso modalità di funzionamento tradizionali e sicure.

Per quanto riguarda i modelli capaci di apprendere in servizio, le linee guida dell'FAA raccomandano l'impiego di involucri di sicurezza fisici. Questi moduli deterministici indipendenti monitorano le uscite generate dagli algoritmi intelligenti. Qualora la rete neurale suggerisca un comando che superi le barriere fisiche di sicurezza, l'involucro deterministico interviene escludendo il modulo intelligente e assumendo il controllo diretto del velivolo.

La spiegabilità deve evolvere per soddisfare i requisiti cognitivi degli operatori umani. L'introduzione di interfacce basate su mappe termiche visive supporta i controllori del traffico aereo nella comprensione delle raccomandazioni generate dai sistemi predittivi di bordo. Gli studi dimostrano che la disponibilità di queste spiegazioni grafiche riduce il carico di lavoro mentale degli operatori, favorendo un'adozione consapevole della tecnologia.

Inoltre, l'applicazione di algoritmi di elaborazione del linguaggio naturale velocizza le attività di investigazione sugli incidenti di volo, estraendo relazioni logiche dai registratori di cabina e dai log di bordo per produrre relazioni tecniche obiettive. Infine, l'integrazione di soluzioni di spiegabilità all'interno degli stessi strumenti di sviluppo assiste gli ingegneri nell'individuazione precoce di difetti logici durante la fase di programmazione avionica secondo lo standard DO-178C.

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano

Bibliografia accademica

Acharya, K., Sharifi, I., Lad, M., Sun, L., & Song, H. (2025). Integrating neurosymbolic AI in advanced air mobility: A comprehensive survey. *Proceedings of the Thirty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 10362–10370. https://doi.org/10.24963/ijcai.2025/1151

Amir, G., Wu, H., Barrett, C., & Katz, G. (2021). An SMT-based approach for verifying binarized neural networks. In J. F. Groote & K. G. Larsen (Eds.), *Tools and algorithms for the construction and analysis of systems: TACAS 2021* (Vol. 12652, pp. 203–222). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72013-1_11

Boroujeni, S. P. H., Razi, A., Khoshdel, S., Afghah, F., Coen, J. L., O'Neill, L., Fule, P., Watts, A., Kokolakis, N. M. T., & Vamvoudakis, K. G. (2024). A comprehensive survey of research towards AI-enabled unmanned aerial systems in pre-, active-, and post-wildfire management. *Information Fusion, 108*, Article 102369. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102369

Corsi, D., Marchesini, E., & Farinelli, A. (2021). Formal verification of neural networks for safety-critical tasks in deep reinforcement learning. *Proceedings of the Thirty-Seventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence, 161*, 333–343. https://proceedings.mlr.press/v161/corsi21a.html

D'Ambrosio, A., & Furfaro, R. (2024). Learning fuel-optimal trajectories for space applications via Pontryagin neural networks. *Aerospace, 11*(3), 228. https://doi.org/10.3390/aerospace11030228

El Mir, H., & Perinpanayagam, S. (2022). Certification of machine learning algorithms for safe-life assessment of landing gear. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9*, 896877. https://doi.org/10.3389/fspas.2022.896877

Federal Aviation Administration. (2024). *Roadmap for artificial intelligence safety assurance* (Version I). U.S. Department of Transportation. https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/step/roadmap_for_AI_safety_assurance

Hunt, W. (2020). *The flight to safety-critical AI: Lessons in AI safety from the aviation industry*. Center for Long-Term Cybersecurity, University of California, Berkeley. https://cltc.berkeley.edu/publication/new-report-the-flight-to-safety-critical-ai-lessons-in-ai-safety-from-the-aviation-industry/

Luettig, B., Akhiat, Y., & Daw, Z. (2024). ML meets aerospace: Challenges of certifying airborne AI. *Frontiers in Aerospace Engineering, 3*, 1475139. https://doi.org/10.3389/fpace.2024.1475139

Mousavi, M., Caldwell, C., Baltes, J., Parizad, F. A., Aljasem, M., Lee, B. J., & Karimi, N. (2026). Physics-informed neural networks in clean combustion: A pathway to sustainable aerospace propulsion. *Chemical Engineering Research and Design, 226*, 258–281. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2026.01.008

Sito web: www.ratioiuris.it
Informazioni: info@ratioiuris.it
Redazione: redazione@ratioiuris.it
Coordinamento Generale: Avv. Maria Antonietta Bozza
Coordinamento Editoriale: Avv. Stenio Salzano