

Orizzonti

N.1 - FEBBRAIO 2025



Intelligenza Artificiale e operazioni spaziali



Agenzia Spaziale Italiana

Orizzonti

La collana editoriale a cura
del Consiglio Tecnico Scientifico di ASI, dedicata
ad approfondimenti su nuovi studi del settore spazio.

Progetto grafico by Paola Gaviraghi - DCI ASI -
Ufficio Comunicazione - Editoria e Grafica

Consiglio Tecnico Scientifico di ASI:

Prof. **Paolo Tortora** – Alma Mater Studiorum – Università di Bologna –
Dipartimento di Ingegneria Industriale

Ten Col. **Ferdinando Dolce** – Ministero della Difesa -
Direzione Nazionale degli Armamenti

Prof.ssa **Monica Monici** - LC ASAcampus, ASA Div. Ric. - Università
di Firenze - Dip. Scienze Biomediche Sperimentali e Cliniche

Prof.ssa **Sandra Savaglio** – Università della Calabria –
Dipartimento di Fisica

Prof.ssa **Stefania De Pascale** – Università degli Studi di Napoli
“Federico II” – Dipartimento di Agraria

Prof. **Jacopo Tirillò** – Sapienza Università di Roma –
Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente

In redazione:

Alberto Caponi – ASI – Direzione Sicurezza, sistemi informatici
e digitalizzazione - Ufficio Sicurezza e strategie

Francesco Caprio – ASI – Presidenza - Ufficio Supporto organizzativo

Eloisa Menegoni – ASI – Presidenza - Ufficio Coordinamento strategico

Documento distribuito con licenza Creative Commons BY-NC-ND 4.0

Intelligenza Artificiale e operazioni spaziali

Introduzione

L'Intelligenza Artificiale (IA) ha la potenzialità di trasformare il dominio spaziale, rivoluzionando il modo in cui:

- le missioni spaziali vengono pianificate, operate e valorizzate in termini di prodotti e servizi generabili;
- il dominio spaziale stesso viene monitorato, analizzato, salvaguardato e protetto;
- i dati raccolti dallo spazio vengono analizzati e gestiti a terra.

L'IA non riguarda solo prodotti e servizi forniti dal settore spaziale ma innesca anche l'ascesa di nuovi modelli di *business*: l'IA è strumento per supportare anche la *Space Economy* e, in generale, le industrie del settore spaziale e non, in modo tale da garantire un alto livello di competitività al Paese. Le soluzioni di IA possono migliorare ed impattano su molti dei domini di competenza sotto il mandato dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI): sostegno all'inno-

vazione tecnologica, supporto alla ricerca, sostegno all'industria e alle amministrazioni pubbliche, etc.

Il presente *paper* sviluppa alcune riflessioni sugli impatti dell'IA a tutto tondo nel settore Spazio, ed è articolato in quattro sezioni:

1 • L'IA nel dominio spaziale;

2 • Applicazioni dell'IA alle operazioni spaziali in orbita;

3 • Applicazioni dell'IA ai sistemi bioregenerativi di supporto alla vita e alla biomedicina spaziale;

4 • Rischi dell'IA nel dominio spaziale e misure di difesa.

1 L'IA nel dominio spaziale



Le potenziali applicazioni dell'IA variano dalla progettazione di missioni e controllo di satelliti fino all'analisi di dati complessi raccolti dallo spazio: con l'aumentare della complessità e della quantità di dati gestiti nel settore spaziale, l'IA diventa sempre più essenziale per migliorare l'efficienza operativa, ridurre i costi e abilitare nuove capacità. Essa rappresenta una svolta strategica anche nel dominio spaziale, in grado di rivoluzionare la navigazione, il controllo, la gestione autonoma dei satelliti e il supporto operativo alle missioni di lunga durata, come quelle della Stazione Spaziale Internazionale (ISS). Questo do-

cumento esplora i potenziali benefici e le sfide connesse all'integrazione dell'IA nel dominio spaziale. Tale integrazione offre un futuro più efficiente e sicuro per le missioni spaziali, con significative ripercussioni in termini di efficienza operativa, sostenibilità e innovazione, ma merita senza dubbio un elevato e adeguato livello di sicurezza e robustezza.

In questa figura è sintetizzata un'analisi SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats*) relativa all'utilizzo dell'IA nel dominio spaziale.

Strengths

elaborazione dei dati: rapida analisi Big Data, come le immagini satellitari, migliorando il processo decisionale e la pianificazione

operazioni autonome avanzate: operazioni autonome nello spazio profondo, dove la comunicazione in tempo reale con la terra è difficile (e.g. missione LICIAcube)

automazione dei compiti ripetitivi: molte operazioni spaziali comportano compiti ripetitivi sia nel *ground segment* (*space control centre*) sia nel processamento a bordo

manutenzione predittiva: previsione guasti analizzando i dati dei sensori

Weaknesses

complessità e costo di implementazione: investimento in infrastrutture, dati e personale qualificato

dipendenza dai modelli di apprendimento automatico (upgrade continuo): modelli di apprendimento automatico suscettibili di errori e che richiedono aggiornamenti, riaddestramento e ottimizzazione costanti

limitazioni e qualità dei dati: necessità di dati abbondanti e di alta qualità

vulnerabilità alla sicurezza informatica: nuovi rischi di sicurezza informatica con esposizione a *hacking* e manipolazioni.

Opportunities

supporto per le missioni spaziali umane: l'IA può supportare gli astronauti in tempo reale monitorando i segni vitali, le condizioni ambientali e i potenziali pericoli

innovazione alla navigazione autonoma: più efficienti le missioni spaziali, gli ingaggi e l'esplorazione

miglioramento della gestione dei detriti spaziali e nella caratterizzazione dei RSO (*Resident Space Objects*): l'IA può aiutare a tracciare, prevedere e gestire i detriti spaziali e a caratterizzare le missioni sconosciute (non a catalogo), riducendo i rischi di collisione e garantendo un dominio spaziale più sicuro

osservazione della terra potenziata: l'IA applicata ai satelliti di osservazione terrestre può migliorare la gestione dei disastri, la ricerca sul clima, il monitoraggio delle risorse naturali, dei confini e del rilevamento automatico di oggetti noti e di anomalie

robotica: l'automazione che può generare l'IA abilita operazioni robotiche spaziali innovative

Threats

cyber-threats: con l'aumento dell'uso di IA nello spazio le minacce informatiche rivolte alle risorse spaziali guidate dall'IA potrebbero incrementare. Tale vulnerabilità crea una dipendenza eccessiva in caso di fallimento degli algoritmi e in mancanza di ridondanze umane per risolvere imprevisti

sfide etiche e legali: l'IA nello spazio può sollevare preoccupazioni etiche riguardo alla responsabilità, soprattutto nelle decisioni autonome, anche considerando i quadri giuridici che nello spazio sono poco sviluppati

sfide quadro regolamentativo: lo sviluppo rapido della tecnologia IA supera la velocità di applicazione delle misure regolatorie: questo potrebbe portare a equivoci o eventi di difficile *'accountability'* che potrebbero scaturire in crisi della cooperazione internazionale nel dominio spaziale tra governi e/o agenzie

Progettazione e pianificazione delle missioni

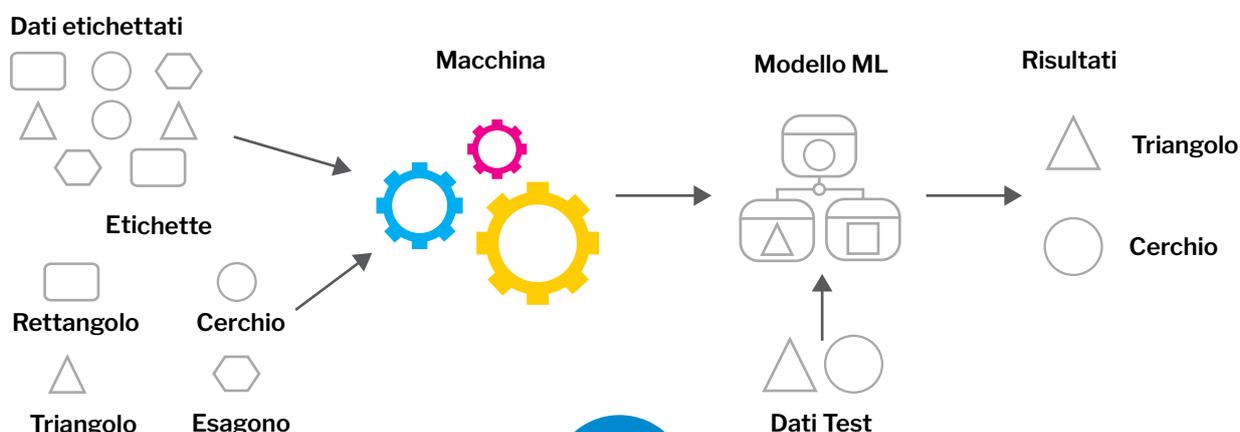
Le missioni spaziali possono essere migliorate notevolmente sia in fase di progettazione sia in fase di pianificazione della missione da strumenti di IA. La progettazione spaziale spesso sfrutta tecniche e *facilities* di *concurrent design*¹ nei quali i responsabili dei diversi sottosistemi satellitari interagiscono in modo iterativo al fine di individuare le possibili soluzioni implementative. L'IA può supportare tale analisi attraverso algoritmi di ottimizzazione, esplorando un ampio spazio di soluzioni, identificando automaticamente le combinazioni di parametri più promettenti tra massa, potenza, ecc., ottimizzandoli automaticamente per soddisfare i requisiti di missione e le limitazioni di *budget*. Nello stesso tempo modelli di IA come le Reti Generative Antagoniste (GAN) o gli algoritmi genetici possono creare *design* alternativi partendo dai requisiti iniziali. Questi modelli consentono di generare un'ampia gamma di opzioni, valutando i pro e i contro di ogni soluzione. La *concurrent design* può trarre beneficio anche da Modelli di Ottimizzazio-

ne Multi-Obiettivo particolarmente utili per bilanciare obiettivi contrastanti (costi/prestazioni), quali: algoritmi genetici, *Particle Swarm Optimization*. I dati storici di progettazione e i test di missione precedenti, inoltre, possono nutrire Modelli di Apprendimento Supervisionato e Non Supervisionato applicabili per identificare *pattern* e correlazioni.

La pianificazione satellitare, invece, può essere migliorata dall'IA in diversi campi di applicazione. Alcuni sviluppi particolarmente efficaci sono i prodotti analitici che si possono generare dall'identificazione automatica di obiettivi di interesse con processamento *on-board* su missioni di Osservazione della Terra. Tali automatismi, basati su algoritmi di IA possono per esempio abilitare tecniche di *rapid re-tasking* o di cosiddetto *tip&cueing* particolarmente efficaci in caso di missioni sviluppate su costellazioni numerose o tra piattaforme interconnesse con *inter-satellite link* sia esso ottico o RF (Radiofrequenza).

¹ Il *concurrent engineering* è un insieme organico di metodologie, tecniche e strumenti che consente un approccio alla progettazione integrata di un prodotto e del relativo processo produttivo.

Apprendimento Supervisionato





Crediti: Shutterstock

Navigazione e controllo dei satelliti

L'utilizzo dell'IA nella navigazione satellitare si focalizza sull'elaborazione autonoma dei dati di posizionamento, predizione di traiettorie e gestione delle orbite, consentendo operazioni più precise e resilienti. Le tecniche di *Machine Learning (ML)*, tra cui algoritmi di apprendimento rinforzato, vengono impiegate per sviluppare sistemi di navigazione adattivi in grado di gestire

condizioni spaziali dinamiche e impreviste, come i detriti orbitanti. Inoltre, i modelli predittivi di IA possono migliorare la gestione del consumo energetico e ottimizzare la traiettoria per ridurre i rischi di collisione. Questo approccio consente un elevato livello di precisione e reattività, migliorando al contempo l'efficienza operativa e riducendo il carico computazionale. L'impiego dell'IA nei satelliti accelera inoltre lo sviluppo di sistemi di navigazione autonomi per costellazioni e *swarm*, rendendo possibili missioni complesse come l'esplorazione cooperativa di corpi celesti.

Elaborazione e analisi dei dati

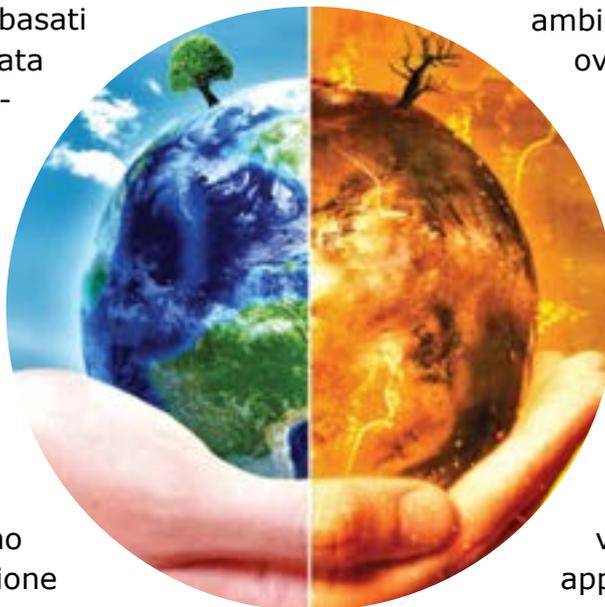
L'uso più estensivo ed efficace dell'IA è certamente evidente nel caso della gestione dei cosiddetti "Big Data". Da questo punto di vista la mole di dati che verrà generata in modo sempre più intenso dalle numerose costellazioni di Osservazione della Terra ad uso sia civile che di difesa e sicurezza, genereranno l'esigenza operativa di avere idonei strumenti di processamento, anche basati su IA, sempre più elevata e diversificata. Le applicazioni sia per esigenze di monitoraggio ambientale che di "intelligence" o "early warning" da calamità naturali o minacce alla sicurezza nazionale, saranno molteplici. Gli algoritmi generati in tali contesti meritano una particolare menzione e accortezza, in quanto si potrebbero sostituire o essere sempre più a supporto di delicati processi decisionali, siano essi legati a esigenze di emergenze e catastrofi, tanto quanto legati ad operazioni di sicurezza e difesa. In tale contesto va quindi evidenziato quanto tali algoritmi meritino un elevato e adeguato livello di protezione: l'alterazione delle relative elaborazioni, infatti, potrebbe generare analisi e interpretazioni dei dati satellitari fuorvianti e quindi paradossalmente

contro-producenti. Oltretutto, molti di tali algoritmi si basano su tecniche di cosiddetto sopra citato ML che necessitano di un'ingente mole di dati per essere "addestrati".

Nel caso di applicazioni di sicurezza e difesa, si potrebbe fare uso anche di dati classificati che, quindi, richiederebbero una garanzia di sicurezza aggiuntiva ed infrastrutture opportunamente realizzate per lo sviluppo ed il processamento di questi dati. Questo scenario rappresenta una sfida particolare in cui modelli di IA sviluppati dovrebbero essere ospitati su ambienti *cloud* "air-gapped", ovvero totalmente *offline*, garantendo che i dati classificati rimangano isolati, sovrani, proteggendoli da potenziali minacce informatiche e fughe di informazioni.

I dati di telerilevamento satellitare possono offrire un ventaglio ampissimo di applicazioni basate su algoritmi di IA. Da questo punto di vista le immagini acquisite nel corso degli anni da parte delle missioni del programma EU Copernicus, ad esempio, rappresentano una base di dati preziosissima per addestrare algoritmi di IA.

Tra le applicazioni più rilevanti vi sono certamente quelle legate al Monitoraggio Ambientale e ai Cambiamenti Climatici. L'IA può essere utilizzata per monitorare deforestazione, desertificazione, fusione dei



Crediti: NASA

ghiacciai, qualità dell'aria e cambiamenti climatici, identificando e quantificando le variazioni nel tempo. Algoritmi di *Deep Learning* analizzano serie temporali di immagini satellitari per individuare e misurare la perdita di superficie forestale o l'estensione dei ghiacci polari. Tali applicazioni possono essere sviluppate sia su base di dati ottici che su base di dati SAR (*Synthetic Aperture Radar*) quali quelli generati dalla missione duale COSMO-SkyMed. Ma attraverso l'IA è anche possibile analizzare le immagini satellitari per monitorare lo stato delle colture, prevedere i raccolti e ottimizzare l'uso di risorse come l'acqua e i fertilizzanti.

Nel settore dell'emergenza e sicurezza l'IA permette una rapida identificazione e valutazione dei danni causati da disastri naturali come terremoti, alluvioni, uragani e incendi o eventi bellici.

Tramite applicazioni di *automatic change detection*

basati principalmente su tecniche di interferometria radar l'IA analizza le immagini pre e post-disastro per valutare la portata dei danni e individuare le aree che necessitano di intervento immediato, migliorando la risposta umanitaria o interventi di sicurezza e difesa.

Oltretutto, i sistemi di IA aiutano a rilevare e monitorare attività sospette, movimenti

di veicoli e variazioni in aree critiche per la sicurezza nazionale, individuando ad esempio imbarcazioni o *target* sospetti con algoritmi di ML che possono individuare e in alcuni casi tracciare e identificare oggetti non previsti in aree militari, navi, veicoli terrestri o movimenti di mezzi aerei in aeroporti, fornendo informazioni preziose per l'*intelligence* o avvertendo tempestivamente i responsabili della conduzione di un'operazione di difesa e sicurezza nazionale.

Ricapitolando, le tecniche di IA utilizzate per l'analisi delle immagini satellitari sono svariate, ovvero:

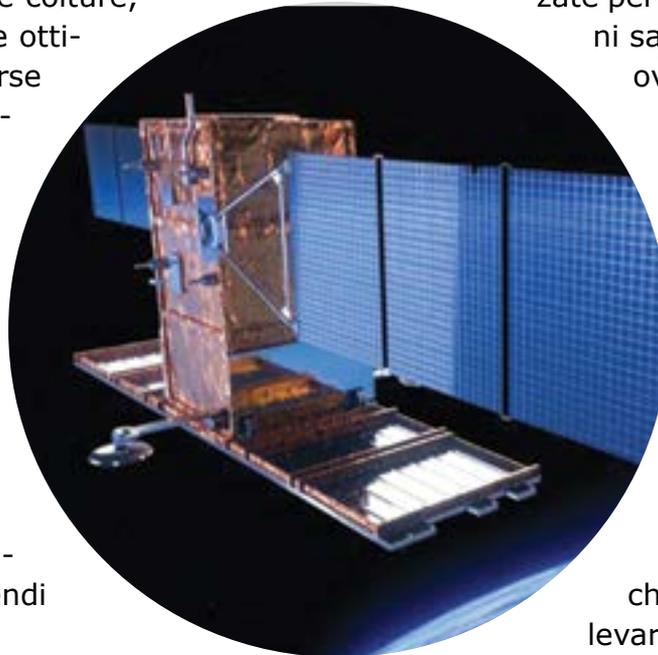
- Reti Neurali Convolutionali (CNN), che possono rilevare schemi complessi e dettagli in immagini ad alta risoluzione;

- Apprendimento Supervisionato, utilizzato per classificare immagini satellitari su base etichettata che aiuta a rilevare specifici tipi di terre

no, colture, infrastrutture, obiettivi di interesse;

- Apprendimento Non Supervisionato, come gli algoritmi di *clustering* utili per individuare *pattern* o cambiamenti in dati non etichettati.

- Reti Generative Antagoniste (GAN) che vengono utilizzate per generare immagini "sintetiche" realistiche che possono essere utili ad addestrare altri modelli IA o per simulazioni.



Crediti: COSMO-SkyMed @ASI



Comunicazioni

L'IA inizia a rivestire un ruolo chiave nel miglioramento delle comunicazioni spaziali, rendendole più efficienti, affidabili e autonome. Le comunicazioni *Space-to-Ground* possono essere ottimizzate grazie ad algoritmi di apprendimento automatico (ML) che analizzano grandi quantità di dati per migliorare la qualità del segnale, ridurre i tempi di latenza e ottimizzare l'allocazione delle risorse di rete.

Fra le applicazioni più significative dell'IA spicca quella relativa alla gestione dinamica dello spettro. Algoritmi basati su IA possono identificare automaticamente le frequenze disponibili e mitigare interferenze in tempo reale, massimizzando l'efficienza dello spettro radio, specialmente in costellazioni di satelliti che operano all'interno di bande congestionate. Questa tecnologia è particolarmente utile nelle reti di satelliti in orbita terrestre bassa (LEO - *Low Earth*

Orbit), che richiedono frequenti *handover* tra stazioni di terra.

Un'altra applicazione rilevante è la compressione e l'identificazione della priorità dei dati: sistemi basati su IA possono selezionare autonomamente i dati più rilevanti da trasmettere, riducendo la larghezza di banda necessaria e migliorando l'efficienza delle missioni scientifiche. Ad esempio, nella missione NASA *Mars Perseverance Rover*, un algoritmo di IA filtra le immagini raccolte per inviare solo quelle di maggiore interesse scientifico. Il processamento dati *on-board* presenta dei vantaggi che richiedono la progettazione della infrastruttura di calcolo valutando i vincoli dati dallo spazio: ad oggi le schede grafiche e le infrastrutture per l'IA sono molto pesanti e voluminose, conseguentemente non è possibile trasferire infrastrutture così ingombranti su satelliti, ma è necessario sviluppare delle tecnologie che possano essere adattate al volo satellitare che richiede una tipologia di strumentazione più leggera possibile.

Space Situational Awareness

Una capacità di *Space Situational Awareness* (SSA), per definizione, necessita per essere espletata di una mole di dati elevatissima, distribuita sul globo terrestre e proveniente da fonti sensoristiche differenti, con *performance* eterogenee, sia *ground-* che *space-based*. Oltretutto, l'analisi di tali dati necessita di essere effettuata con accuratezza e velocità, al fine di

fornire servizi e prodotti che possano essere strumenti operativi efficaci a chi gestisce la piattaforma satellitare. È bene evidenziare che mentre per specifiche esigenze di *safety* l'SSA necessita di acquisire ed elaborare dati accurati inerenti la posizione e la velocità degli oggetti orbitanti, cosiddetti *Resident Space Objects* (RSO), per quanto riguarda le esigenze di sicurezza e difesa, quali la scoperta di oggetti non presenti a catalogo, tali informazioni non sono sufficienti e necessitano di essere corredate da ulteriori informazioni necessarie alla caratterizzazione e interpretazione delle manovre e della missione potenzialmente minacciosa. Tali ulteriori informazioni, tipiche di una SSA ad uso di difesa, aumentano le potenzialità dell'IA per applicazioni di SSA, soprattutto per quel che riguarda la capacità di predizione della determinazione orbitale e dell'*imaging recognition*.

Modelli di apprendimento automatico che sono in grado di analizzare immagini provenienti da telescopi e sistemi radar per identificare nuovi oggetti o confermare le posizioni di quelli conosciuti, possono fornire un ausilio all'operatore SSA notevole, mentre algoritmi basati sull'IA possono sfruttare i dati storici e in tempo reale calcolare le probabilità di collisione tra due oggetti.

Sfruttando la capacità dell'IA di elaborare e interpretare grandi *set* di dati raccolti dai sistemi SSA, tendenzialmente in aumento esponenziale con l'aumentare degli RSO, si possono individuare tendenze e anomalie sulle traiettorie orbitali, identificando comportamenti insoliti di satelliti o prevedendo i percorsi orbitali futuri e le loro implicazioni per il traffico spaziale.

Tali funzioni sono particolarmente rilevanti



anche per applicazioni di gestione del cosiddetto "traffico spaziale" (*Space Traffic Management*), che potrebbe far leva su algoritmi di IA proprio per gestire e ottimizzare l'analisi dei dati provenienti dalle acquisizioni sensoristiche finalizzate alla determinazione dei parametri orbitali dei sempre più numerosi "*space debris*" e per proporre eventuali manovre orbitali più o meno opportune agli operatori satellitari, siano essi civili, privati o militari.

Le soluzioni di IA in questo caso dovranno soddisfare anche requisiti di *human oversight*; con ciò si intende la capacità da parte umana di effettuare revisioni complete degli algoritmi, delle fonti dati e degli *output* generati per garantire che i modelli si comportino come previsto per non produrre effetti dannosi. I meccanismi di *human oversight* possono essere eseguiti durante la fase di sviluppo, o durante le operazioni o *after-deployment*, in questo ultimo caso il monitoraggio è in tempo reale perché gli impatti potrebbero causare danni irreversibili².

²I requisiti di *human oversight* sono molto utilizzati nei settori sanitario, finanziario e della giurisprudenza e potrebbero comunque essere estesi, sulla base di opportune valutazioni, ad altri ambiti di applicazione dell'Intelligenza Artificiale.

2 Applicazioni dell'IA alle operazioni spaziali in orbita

Gestione e controllo autonomo dei satelliti

L'IA abilita anche il controllo autonomo dei satelliti, rendendoli in grado di rilevare (e anche prevedere), analizzare e rispondere a eventuali anomalie senza intervento umano. Le tecniche di ML utilizzate per

la rilevazione di guasti (*Fault Detection, Isolation and Recovery, FDIR*), riducono il tempo di risposta a malfunzionamenti e aumentano l'autonomia del satellite. Tale autonomia si traduce in satelliti resilienti, capaci di autodiagnosi e correzione dei propri sistemi in tempo reale, anche in assenza di comunicazioni con il centro di controllo a Terra. Un recente esempio è rappresentato dalla missione ESA OPS-SAT, un satellite progettato per testare nuove tecnologie di controllo autonomo, che utilizza l'IA per monitorare e gestire in modo efficiente il carico utile e i sottosistemi. Tecniche come l'apprendimento automatico e i sistemi di visione artificiale sono essenziali per la manutenzione preventiva, identificando in anticipo potenziali guasti e riducendo i costi di gestione. Questo rende possibile il coordinamento di flotte satellitari (o "costellazioni") che lavorano in sinergia, migliorando la qualità e la tempestività dei dati raccolti.

Missioni di servizio e riparazione in orbita

Le missioni di *in-orbit servicing* presuppongono operazioni di *rendez-vous* e operazioni di prossimità tra oggetti orbitanti che solitamente sono costituiti da una piattaforma che effettua l'intervento in

orbita e da una piattaforma che lo riceve, per esigenze di riparazione, sostituzione o prolungamento dell'autonomia.

Tali operazioni sono molto sfidanti in termini di *safety* e in aggiunta spesso necessitano di un alto grado di autonomia, soprattutto per analizzare i dati provenienti dai sensori che sono necessari proprio per mitigare i rischi di accoppiamento non ottimale. Tali operazioni necessitano quindi di elaborare una notevole mole di dati, non necessariamente omogeni, ovvero provenienti da più tipologie di sensori, e non necessariamente ad elevata risoluzione. Il processamento di tali dati e l'analisi predittiva deve scaturire dalle successive informazioni elaborate, che per essere efficaci devono avvenire in tempi rapidissimi, ma soprattutto possono usufruire di algoritmi di IA per affinare l'analisi e la loro interpretazione, abilitando la capacità di semi-autonomia o autonomia completa della missione.

L'affidabilità di tali algoritmi, tuttavia, abilitando manovre autonome o semi-autonome, necessita di un livello di robustezza elevatissimo e finalizzato a garantire il mantenimento dei necessari requisiti di *safety e security*.

In generale, le soluzioni di IA devono soddisfare *by design* i criteri di **Fairness, Transparency, Security, Safety, Accountability, Trustworthiness e Human Oversight**. Inoltre, negli ultimi anni, sono state sviluppate linee di ricerca in modo tale da garantire un certo livello di *Explainability* degli algoritmi implementati, ovvero la possibilità di rendere più chiari i processi decisionali degli algoritmi stessi spesso accusati di interpretare i dati come *black box*.

Supporto alle Operazioni della Stazione Spaziale Internazionale (ISS)

Con un'elevata complessità tecnica e operativa, la gestione della ISS richiede una pianificazione rigorosa, il coordinamento di risorse internazionali e una risposta rapida ed efficace agli imprevisti. In questo contesto, l'IA sta emergendo come uno strumento cruciale per migliorare l'efficienza, la sicurezza e l'efficacia delle operazioni a bordo e da terra. Nella ISS, l'IA può supportare il monitoraggio dei sistemi, l'analisi dei dati di missione e la gestione dell'inventario, automatizzando le attività più ripetitive e riducendo il carico di lavoro degli astronauti. Gli assistenti robotici dotati di IA, come l'*Intelligent Personal Assistant* per astronauti, possono facilitare le comunicazioni e le istruzioni operative, migliorando la sicurezza a bordo. Inoltre, l'IA può elaborare dati provenienti da esperimenti scientifici in tempo reale, migliorando l'efficienza della ricerca e contribuendo a prendere decisioni operative basate sui risultati ottenuti.

La ISS è dotata di numerosi sottosistemi critici, tra cui quelli dedicati al controllo termico, alla generazione di energia, al riciclo dell'aria e dell'acqua, e alla protezione dai detriti spaziali. L'IA viene impiegata per predire guasti e anomalie attraverso modelli di *Predictive Maintenance* addestrati su dati storici, consentendo interventi preventivi e riducendo il rischio di interruzioni operative. Inoltre, algoritmi di IA ottimizzano la distribuzione dell'energia genera-



La Stazione Spaziale Internazionale. Crediti: NASA

ta dai pannelli solari in base alle esigenze della stazione e alle previsioni di esposizione al Sole. Sistemi robotici, come il Canadarm2 e altre piattaforme, possono essere gestiti da algoritmi di IA per eseguire ispezioni esterne e compiti di manutenzione con minima supervisione umana.

Gli astronauti a bordo della ISS affrontano carichi di lavoro intensi e complessi, e l'IA può agire come un assistente virtuale per fornire supporto nelle attività quotidiane. Sistemi come il modulo CIMON (*Crew Interactive MOBILE Companion*), sviluppato in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), rispondono a comandi vocali, offrono informazioni tecniche e guidano gli operatori attraverso procedure di manutenzione o esperimenti scientifici. L'IA analizza dati biometrici raccolti da sensori in-



dossabili per monitorare lo stato di salute degli astronauti e prevedere condizioni critiche come stress fisico o mentale, consentendo interventi tempestivi. Algoritmi di *Natural Language Processing* (NLP) facilitano la comunicazione multilingue tra equipaggi internazionali e i centri di controllo a Terra, migliorando la collaborazione.

La pianificazione delle attività a bordo della ISS è un processo complesso che richiede di bilanciare le esigenze scientifiche, operative e logistiche.

L'IA può ottimizzare i programmi di lavoro generando pianificazioni ottimali per gli astronauti, tenendo conto delle priorità, delle dipendenze tra le attività e delle limitazioni temporali. In caso di imprevisti, l'IA riorganizza rapidamente il calendario delle attività, minimizzando l'impatto delle interruzioni e massimizzando l'efficienza operativa. Inoltre, monitora lo stato delle scorte a bordo e ottimizza la gestione delle risorse critiche come cibo, acqua e materiali scientifici, fornendo previsioni sui futuri approvvigionamenti.

La ISS opera in un ambiente ostile, dove i rischi includono collisioni con detriti spaziali, esposizione a radiazioni e guasti ai sistemi vitali. L'IA contribuisce al monitoraggio dei detriti spaziali analizzando dati provenienti da reti di tracciamento per

identificare possibili collisioni e suggerire manovre correttive. Sistemi basati su IA prevedono i livelli di radiazione e ottimizzano le strategie per ridurre l'esposizione degli astronauti, ad esempio, suggerendo periodi sicuri per attività extraveicolari (EVA). In situazioni critiche, come incendi o perdite di pressione, l'IA analizza rapidamente i dati dai sensori, identifica le cause e suggerisce le azioni più efficaci per mitigare il rischio.

Un aspetto fondamentale della ISS è la ricerca scientifica. L'IA supporta gli esperimenti scientifici automatizzandoli, monitorando le condizioni e adattando i parametri in tempo reale per massimizzare la qualità dei dati raccolti. Algoritmi avanzati elaborano i dati scientifici direttamente a bordo, riducendo la necessità di trasferire grandi volumi di informazioni a Terra e accelerando il processo di scoperta scientifica. Modelli predittivi aiutano a valutare l'impatto di diverse configurazioni sperimentali, migliorando l'efficienza delle risorse a disposizione.

L'IA sta giocando un ruolo sempre più centrale nelle operazioni della ISS migliorando la gestione dei sistemi di bordo, il supporto agli astronauti, la sicurezza e l'efficienza complessiva. Le applicazioni dell'IA non solo potenziano le capacità operative della ISS, ma rappresentano anche un banco di prova fondamentale per l'utilizzo dell'IA in missioni spaziali future, come quelle dirette verso la Luna e Marte. L'integrazione dell'IA nelle operazioni spaziali non è solo una scelta tecnologica, ma una necessità per affrontare le sfide crescenti del dominio spaziale.

3

Applicazioni
dell'AI
ai sistemi
biorigenerativi
di supporto
alla vita e alla
biomedicina
spaziale

L'obiettivo finale di un sistema biorigenerativo è quello di supportare la vita dell'uomo nello spazio, minimizzando la dipendenza dai rifornimenti esterni durante le missioni di esplorazione spaziale di lunga durata. Questi sistemi dovranno essere autonomi e sostenibili. L'integrazione delle potenzialità dell'IA consentirebbe il controllo delle variabili ambientali, delle prestazioni dei rigeneratori e dei flussi biorigenerativi all'interno del sistema adeguandole alle esigenze dell'equipaggio.

Ottimizzazione dei processi biologici

Il monitoraggio e il controllo delle condizioni ambientali nei diversi compartimenti del sistema biorigenerativo sono essenziali per garantire un microclima favorevole alla salute dei diversi organismi biologici affinché svolgano le funzioni assegnate loro. Attraverso l'uso di sensori avanzati e algoritmi di IA, è possibile raccogliere ed elaborare dati in tempo reale su variabili come temperatura, umidità relativa e pressione parziale dei gas nell'atmosfera per controllare automaticamente le condizioni ambientali, garantendo lo svolgimento ottimale delle diverse funzioni biologiche nel tempo. L'analisi predittiva dei flussi in entrata e in uscita di ciascun compartimento può migliorare ulteriormente l'efficienza del sistema. Utilizzando modelli di ML, è possibile prevedere i fabbisogni di nutrienti e risorse, consentendo una gestione proattiva dell'intero sistema.



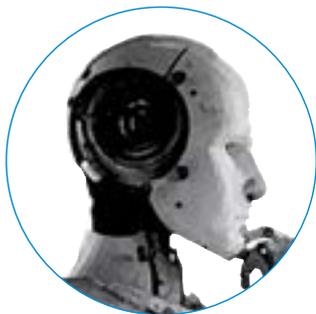
Gestione dei rifiuti

Il riciclo degli scarti organici è essenziale per trasformare gli scarti in risorse utili, riducendo anche il volume dei rifiuti. Sistemi automatizzati, dotati di sensori e IA, possono monitorare la composizione degli scarti per ottimizzare i processi di degradazione biologica, minimizzando i tempi di trattamento.

Inoltre, l'ottimizzazione dei flussi e dei processi attraverso l'uso dell'IA consentirebbe di identificare inefficienze e implementare strategie di miglioramento. Attraverso modelli di classificazione, per esempio, si potrebbe implementare la separazione automatica degli scarti ed attraverso lo sviluppo di piattaforme automatizzate si potrebbe avviare il monitoraggio delle *performance* dei sistemi di riciclo.

Sistemi di supporto decisionale

I sistemi di supporto decisionale sono strumenti fondamentali per la gestione dei sistemi biorigenerativi. Le simulazioni ambientali consentono di testare le reazioni del sistema a scenari diversi, come variazioni climatiche o cambiamenti operativi. Queste simulazioni aiutano a sviluppare strategie di mitigazione e a migliorare la preparazione del sistema a eventuali emergenze. Inoltre, l'IA può fornire un supporto critico per l'allocazione delle risorse durante le missioni, in base alle dinamiche delle esigenze. Analizzando dati in tempo reale, per esempio, l'IA può ottimizzare l'uso di acqua, nutrienti e altri materiali, garantendo che le risorse siano sempre disponibili per soddisfare le necessità dell'equipaggio, minimizzando gli sprechi e migliorando l'efficienza operativa.



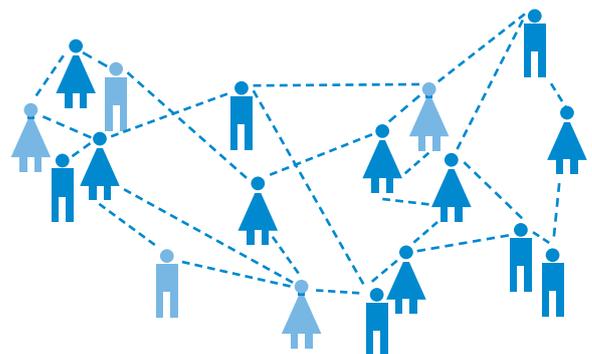
Robotica e automazione

La robotica e l'automazione consentono di effettuare le operazioni anche in assenza di equipaggio umano e/o di ridurre il carico di lavoro degli astronauti. L'integrazione dell'IA permette ai robot di gestire autonomamente compiti ripetitivi e potenzial-

mente pericolosi, come il monitoraggio ambientale e la manutenzione degli impianti, aumentando anche la sicurezza e l'efficienza operativa. Grazie a sensori e algoritmi di analisi, è possibile identificare anomalie e pianificare interventi di manutenzione prima che si verifichino problemi gravi, aumentando così l'affidabilità dei sistemi (ad esempio tramite modelli di *Random Forest*, *Baesian Neural Networks* etc...).

Interazione umana

Le interfacce intuitive sono progettate per semplificare l'interazione degli astronauti con le tecnologie, rendendo più facile monitorare e gestire i sistemi. Queste interfacce possono includere *display* interattivi, comandi vocali e *feedback* visivo, facilitando la comprensione delle informazioni e migliorando la reattività degli astronauti alle condizioni ambientali. Infine, monitorando costantemente i parametri vitali e il benessere psicologico degli astronauti, è possibile intervenire prontamente in caso di problemi, garantendo un ambiente di vita sano e sicuro. L'uso di tecnologie di monitoraggio avanzate, insieme a interfacce intuitive, consente agli astronauti di avere un controllo maggiore sulla loro salute e sul funzionamento del sistema.





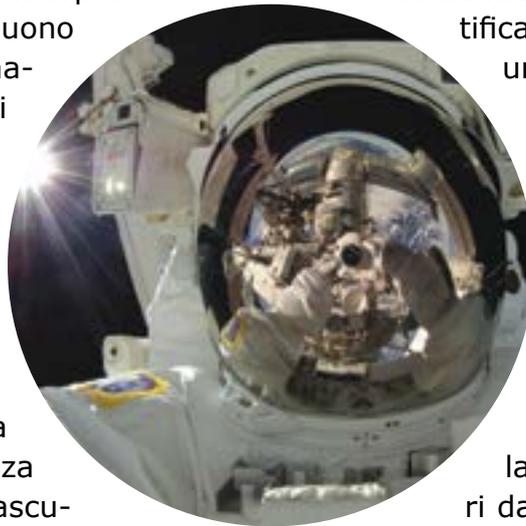
Crediti: NASA/ESA

L'IA applicata al monitoraggio della salute degli astronauti

Lo spazio è un ambiente estremo e il volo spaziale è caratterizzato da molti fattori di *stress* e di potenziale rischio per la salute: condizioni di gravità alterata; raggi cosmici; distanza dalla Terra; condizioni di confinamento-isolamento; ipossia; alterazione dei ritmi circadiani, della nutrizione, del profilo microbico sia dei singoli

soggetti che ambientale; etc. È ben noto che, a causa di ciò, il volo spaziale induce meccanismi di adattamento che provocano alterazioni assai significative della fisiologia umana. Queste, a loro volta, possono essere causa o concausa di danni acuti o cronici, e quindi alterare lo stato di salute e la *performance* dei membri degli equipaggi impegnati in missioni spaziali. Nelle future missioni di esplorazione spaziale oltre la Low Earth Orbit (LEO), alcuni di questi fattori di rischio, come radiazioni e confinamento-isolamento, potranno avere conseguenze ancor più importanti per la salute.

Per le ragioni sopra esposte, è facile comprendere che il monitoraggio della salute degli astronauti e l'elaborazione di modelli di rischio a breve e lungo termine sono aspetti che rivestono un ruolo importantissimo nell'organizzazione delle missioni spaziali sia in LEO che, a maggior ragione, oltre LEO. Attualmente, il monitoraggio della salute degli astronauti è in massima parte attuato mediante telemedicina: una considerevole mole di dati derivanti dal monitoraggio di parametri vitali quali frequenza cardiaca, frequenza respiratoria, pressione sanguigna, temperatura corporea, eventuali ECG e immagini ecografiche viene inviata a Terra e interpretata dai medici che seguono gli astronauti e li informano sugli esiti diagnostici e sulle eventuali misure da attuare. Questa procedura non consente l'esame diretto del paziente e dipende interamente dalla possibilità di trasmettere dati e comunicare fra Terra e Spazio. La latenza nella comunicazione è trascurabile nelle missioni in LEO, mentre avrà un'importanza cruciale nelle future missioni di esplorazione spaziale oltre LEO. È noto che la latenza di trasmissione tra Terra e Marte potrà arrivare a circa 20 min. Un ritardo inaccettabile per situazioni di emergenza. Inoltre, nelle missioni oltre LEO sarà quasi impossibile mettere in atto procedure di evacuazione medica verso Terra e gli equipaggi avranno a disposizione solo farmaci essenziali, che potrebbero subire processi di degradazione nel tempo



e difficilmente potrebbero essere riforniti. È quindi evidente che nei viaggi di esplorazione verso la Luna e Marte sarà necessario cambiare completamente paradigma per la gestione della salute degli astronauti, cercando di passare dall'attuale "dipendenza dalla Terra" a una sempre più ampia "indipendenza dalla Terra".

L'applicazione dell'IA è considerata essenziale per questa transizione. Nel 2021 la NASA ha organizzato un *workshop* sulle future applicazioni dell'IA nella biomedicina spaziale e nella gestione della salute degli astronauti, con lo scopo di raccogliere raccomandazioni dalla comunità scientifica e individuare requisiti per un futuro "*Precision Space Health System*" basato sul supporto dell'IA.

Un tale sistema dovrebbe fornire supporto all'equipaggio (ed anche ai medici a Terra) durante le missioni di lunga durata. La fattibilità del sistema dipende da diversi fattori: la selezione dei biomarcatori da monitorare; lo sviluppo di appositi sensori o altri sistemi analitici e diagnostici; la selezione di soglie cliniche di allerta (che potrebbero essere diverse nello Spazio rispetto a Terra); l'implementazione di un sistema di IA per l'elaborazione e valutazione dei dati (e quindi valutazione dello stato di salute) che sia operativo nel contesto della missione.

Per l'applicazione dell'IA, un aspetto importante è l'addestramento del sistema: esso richiede generalmente grandi quan-

tità di dati, che sarebbero difficilmente raggiungibili nel contesto dell'ambiente spaziale. Sarebbe più facilmente attuabile un pre-addestramento sulla base di conoscenze cliniche-biologiche sulla Terra e di dati provenienti da studi condotti utilizzando analoghi terrestri delle piattaforme spaziali. La quantità di dati "terrestri" dovrebbe comunque essere limitata e man mano sostituita da dati raccolti durante le missioni spaziali, che sono molto più rappresentativi delle condizioni dell'ambiente spaziale. In questo modo il sistema potrebbe essere costantemente perfezionato tramite l'apprendimento da diversi flussi di dati raccolti periodicamente non solo con il monitoraggio dei vari membri dell'equipaggio ma anche dell'ambiente della piattaforma spaziale.

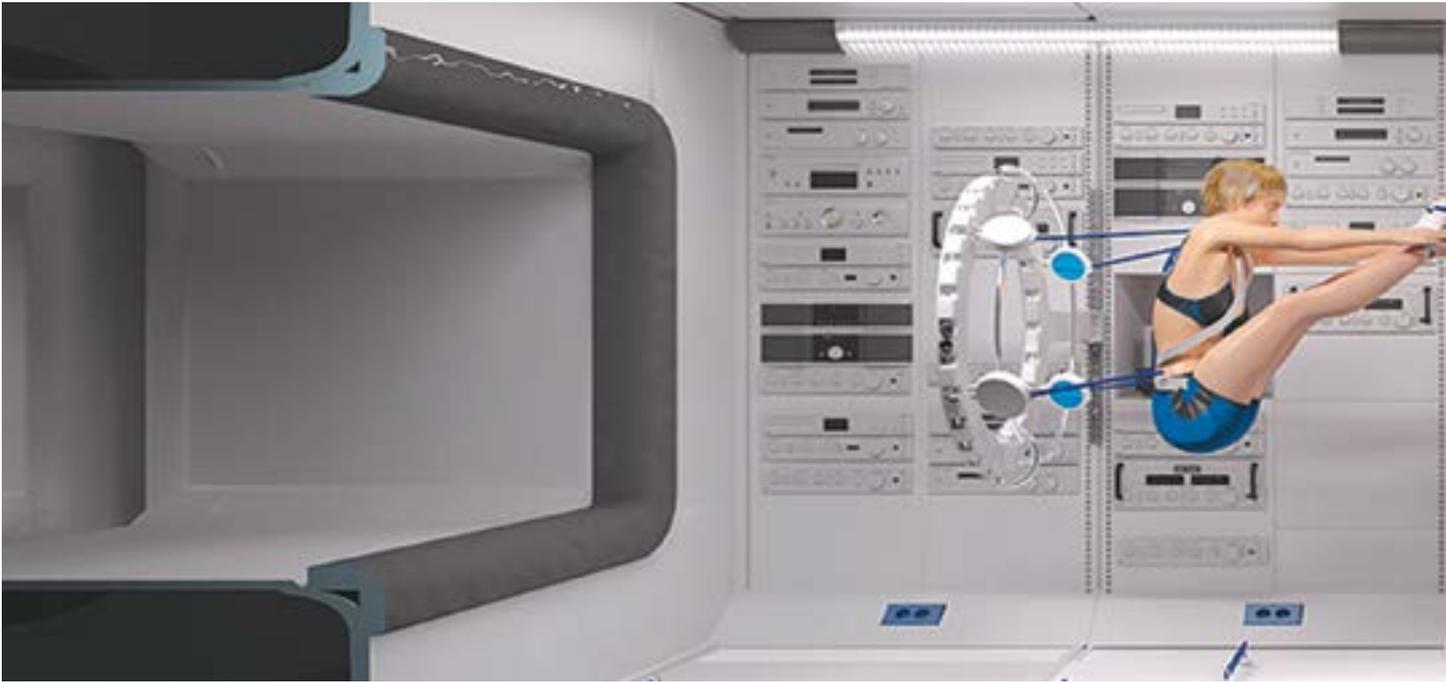
Il monitoraggio a Terra (pre-missione) degli astronauti dovrebbe consentire di tracciare un "profilo basale" di ciascun astronauta. I metodi di IA, mediante il rilevamento di punti di cambiamento o anomalie, potrebbero essere impiegati per identificare deviazioni dal profilo basale indicative di eventi medici potenzialmente avversi. Un tale approccio potrebbe aiutare a prevedere esiti negativi per la salute e a indicare azioni preventive.

L'applicazione dell'IA alla medicina spaziale porrà alcune problematiche. Una, in parte già accennata, è la scarsità di dati relativi agli astronauti impegnati in missioni spaziali. Questi dati sono estremamente importanti per il *training* e la validazione del sistema. Altre riguardano aspetti etici. La relazione astronauta-medico, che è strettamente collegata alla riservatezza



Luca Parmitano si allena sulla ISS. Crediti: ESA
Crediti foto pagina accanto: NASA.

dei dati del paziente, si estende ad una terza entità, l'IA appunto, con implicazioni sulla gestione dei dati e sulla *privacy*. Inoltre, essendo l'IA una tecnologia allo stato sperimentale, l'astronauta dovrebbe essere correttamente informato circa il trattamento dei suoi dati e l'utilizzo di tali dati per il training del sistema e dovrebbe firmare un apposito consenso. Infine, in caso di errori nella diagnosi o nell'indicazione delle contromisure e delle terapie da intraprendere, chi sarà ritenuto responsabile? Malgrado le difficoltà da risolvere, l'applicazione dell'IA può essere una grande opportunità per progredire nella medicina spaziale.

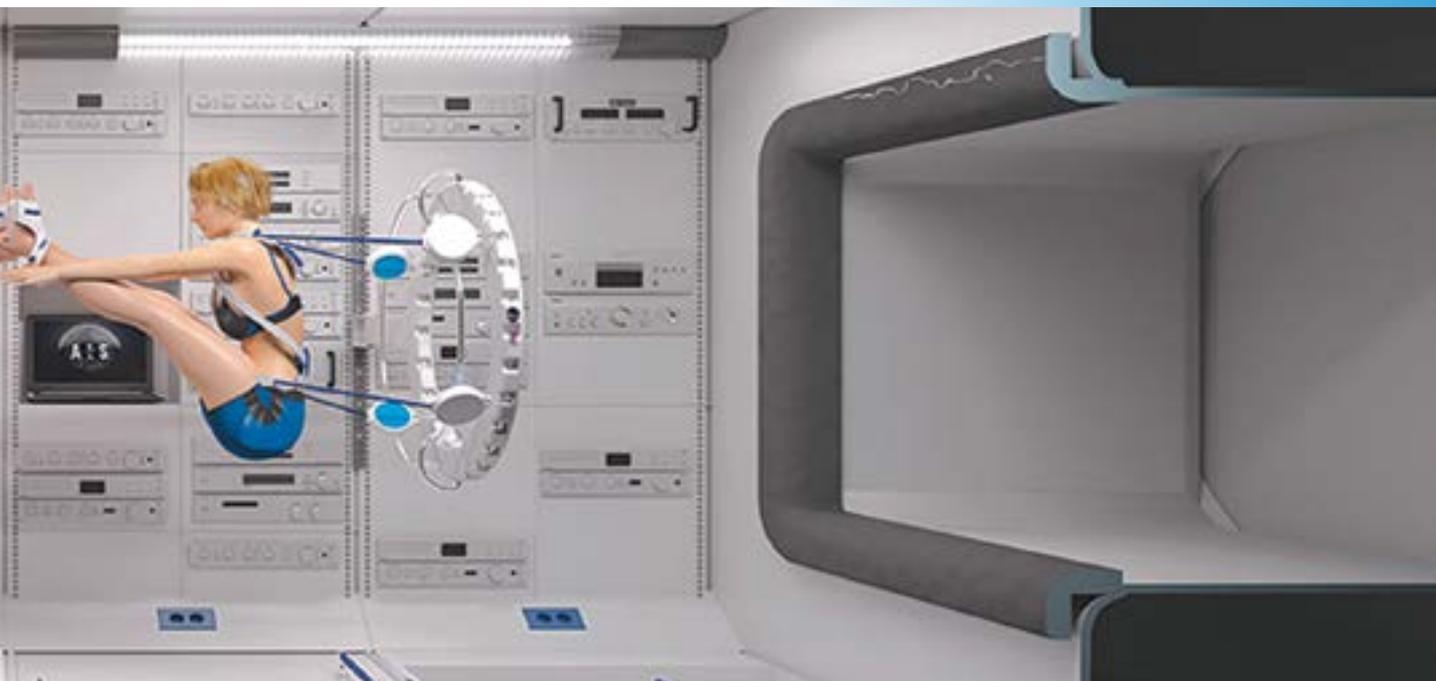


L'IA come supporto decisionale nella biomedicina spaziale

Lo stesso sistema che raccoglie ed elabora i dati fornendo informazioni sullo scostamento o meno dai riferimenti considerati "normali" dovrebbe fornire indicazioni diagnostiche, modelli di rischio acuto e cronico, previsioni sull'evoluzione delle eventuali alterazioni riscontrate e raccomandazioni sulle misure preventive, o contromisure, o strategie terapeutiche da intraprendere. Questo supporto decisionale riguardo alle esigenze operative è fondamentale in un ambiente in cui un medico potrebbe non essere presente e la latenza delle comunicazioni potrebbe vanificare ogni possibilità

di aiuto da Terra. Le indicazioni su "cosa fare" dovrebbero essere elaborate tenendo conto non solo dei dati provenienti dal paziente ma anche di quelli ambientali e relativi alle circostanze (stato delle riserve di farmaci, stato degli altri membri dell'equipaggio, etc.). Il sistema potrebbe anche fornire valutazioni sull'efficacia delle contromisure e/o terapie intraprese e suggerire se continuare il trattamento, interromperlo, o cambiarne la tipologia.

Lo spazio può essere definito come un ambiente povero di risorse, sia diagnostiche che terapeutiche, atte ad affrontare emergenze mediche, chirurgiche e traumatologiche. Inoltre, come già accennato, nelle missioni oltre LEO ci sarebbero scarse possibilità di avere un supporto da Terra in tempo utile o di organizzare un'evacuazione medica. La presenza di un medico a bordo non è garantita e, se ci fosse, po-



Crediti: Annalisa Dominoni, Benedetto Quaquaro, Dipartimento di Design, Politecnico di Milano.

trebbe avere lui stesso problemi di salute. Tuttavia, le situazioni di emergenza richiedono decisioni rapide, che potrebbero essere determinanti per la vita di uno o più membri dell'equipaggio.

Tali decisioni riguardano non solo le azioni da intraprendere (ad es. quali parametri monitorare, quali farmaci somministrare, come operare se è necessario un intervento chirurgico, etc.), ma anche chi assistere per primo, valutando la gravità delle condizioni, se più membri dell'equipaggio hanno bisogno di assistenza contemporaneamente. Gli algoritmi dovranno essere implementati in modo da minimizzare e/o annullare i *bias* cognitivi all'interno dei *set* di dati (quali età, genere etc.) che potrebbero influenzare la decisione finale.

Appare evidente che, per affrontare eventuali situazioni di emergenza in missioni oltre LEO, è indispensabile la presenza di

un sistema di IA a bordo della piattaforma spaziale per valutare correttamente l'evento dal punto di vista medico-chirurgico; valutare le condizioni dei singoli pazienti; indicare ai membri dell'equipaggio chi soccorrere per primo in base alla gravità delle condizioni; guidare i membri dell'equipaggio nelle operazioni di primo intervento e in quelle successive necessarie per la gestione del paziente, inclusa la somministrazione di adeguate terapie.

Una simile tecnologia, non solo è cruciale per mitigare il rischio nel caso di emergenze durante missioni spaziali, ma può anche avere ricadute importanti sulla Terra.

Infatti, anche sulla Terra ci sono ambienti remoti, o estremi, carenti dal punto di vista delle attrezzature e del personale sanitario necessari per fronteggiare situazioni di emergenza medica, che potrebbero beneficiare dell'IA.

4 Rischi dell'IA nel dominio spaziale e misure di difesa

Nonostante i numerosi vantaggi, come l'automazione, l'analisi avanzata dei dati e la gestione delle missioni, l'IA introduce anche nuovi rischi di sicurezza, sia intrinsecamente generati dalla natura stessa della IA, che basa la propria evoluzione e le proprie scelte soltanto sui dati che ha a disposizione, sia come conseguenza di un uso malevolo della tecnologia. Ad esempio, la manipolazione per mezzo di modifiche impercettibili (es. pochi *pixel*) dei dati forniti in input ad un modello di IA, è la strategia alla base dei c.d. *Adver-*

sarial Attack in grado di indurre in errore l'IA con l'obiettivo di portarla a fornire risultati non corretti. È evidente che queste tecniche potrebbero essere sfruttate per ingannare sistemi di riconoscimento delle immagini satellitari, portando, ad esempio, a una classificazione errata di infrastrutture critiche o alla mancata rilevazione di attività sospette. Un attacco *adversarial* potrebbe anche compromettere sistemi di navigazione autonoma, facendo deviare veicoli spaziali a guida autonoma dalla traiettoria senza che il sistema di controllo rilevi anomalie.

La mitigazione di queste minacce richiede un'attenta valutazione dei dati utilizzati per il *training* della IA, garantendo la qualità e la bontà di tali dati, ed una resiliente sanificazione dei dati forniti alla IA per le valutazioni per cui questa viene utilizzata. Ulteriori rischi introdotti dalla IA sono dovuti all'uso malevolo della tecnologia stessa che può essere usata per ottimizzare ed automatizzare attacchi informatici, aggregare informazioni sensibili ed evidenziare nuove vulnerabilità.

Per mitigare queste minacce, sono necessarie misure di sicurezza sofisticate e multilivello, progettate per proteggere sia le infrastrutture spaziali, di volo e di terra, che le operazioni stesse.

Attacchi informatici potenziati dall'IA, resilienza e recovery

Lo sviluppo IA ha introdotto nuove vulnerabilità, trasformando il dominio spaziale in un obiettivo primario per attacchi informatici sempre più sofisticati. Gli attacchi *cyber* potenziati dall'IA rappresentano una minaccia emergente, capace di compromettere infrastrutture critiche come satelliti, sistemi di comunicazione e missioni scientifiche, con potenziali impatti su scala globale. Per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle operazioni spaziali, è fondamentale adottare un approccio multidimensionale che includa resilienza ai *cyber* attacchi e strategie di *recovery*.



Crediti immagini sicurezza informatica: Shutterstock

Gli attacchi informatici che utilizzano l'IA possono identificare e selezionare un obiettivo specifico da colpire (*targeting*), ad esempio satelliti, stazioni spaziali o sistemi di comunicazione. Algoritmi avanzati, come quelli basati sul ML o sul *Deep Learning*, sono in grado di analizzare enormi volumi di dati per individuare vulnerabilità sconosciute dei sistemi (es. *zero-day*). Una volta individuate, queste falle possono essere sfruttate con un elevato livello di precisione, ottimizzando l'efficacia degli attacchi e rendendoli estremamente difficili, se non impossibili, da prevenire o rilevare.

Alcune delle caratteristiche degli attacchi basati sull'IA includono:

- **Automazione avanzata:** l'uso dell'IA consente autonomamente di lanciare attacchi su vasta scala senza necessità di intervento umano diretto, e nascondersi dai sistemi di rilevamento;
- **Adattabilità:** l'IA permette di modificare in tempo reale le tattiche di attacco, reagendo alle contromisure adottate dalla difesa;
- **Attacchi combinati:** gli attacchi basati sull'IA possono combinare più vettori d'at-

tacco (ad esempio, *phishing*, *spoofing* e *denial of service*) per confondere i sistemi di difesa e massimizzare i danni.

L'interruzione delle operazioni satellitari, ad esempio, non solo danneggerebbe missioni scientifiche o commerciali, ma potrebbe anche avere gravi ripercussioni sulla sicurezza globale, considerando la dipendenza da satelliti per la navigazione, le telecomunicazioni e il monitoraggio ambientale. Ad esempio, un sistema meteorologico potrebbe ricevere dati falsi, compromettendo previsioni e interventi umanitari in caso di calamità naturali. In altri casi, gli aggressori potrebbero bloccare la comunicazione o sostituirla con informazioni fraudolente. È possibile anche generare messaggi truffaldini altamente personalizzati (*deepfake*), imitare perfettamente conversazioni in tempo reale o simulare il linguaggio e il tono degli operatori legittimi. Questo tipo di attacco può ingannare gli operatori, spingendoli a eseguire comandi errati o a rivelare credenziali di accesso sensibili.

Un'ulteriore minaccia è rappresentata dagli attacchi agli hardware. L'IA può identificare punti deboli fisici nei componenti elettronici spaziali, come processori o sensori, e sfruttarli per causare malfunzionamenti, causando, ad esempio, surriscaldamenti, blocchi o persino danni irreversibili. L'evoluzione degli attacchi potenziati dall'IA non mostra segni di rallentamento. La continua crescita della complessità delle reti spaziali, combinata con l'aumento del



numero di satelliti in orbita e l'espansione delle operazioni commerciali nello spazio, apre nuovi fronti di vulnerabilità. In un futuro non troppo lontano, si potrebbe assistere a una crescente automazione anche negli attacchi stessi, con malware e botnet potenziati dall'IA capaci di operare in modo completamente autonomo ed indipendente.

Resilienza ai cyber attacchi

La resilienza ai *cyber* attacchi descritti precedentemente è particolarmente complessa, ma vitale. I ritardi nelle comunicazioni possono ostacolare se non rendere impossibile l'intervento umano, i sistemi automatizzati di difesa devono, quindi, essere in grado di agire in autonomia per rispondere agli attacchi. I dispositivi spaziali, inoltre, operano in ambienti estremamente ostili, dove malfunzionamenti indotti da attacchi informatici possono avere conseguenze irreversibili. Un sistema resiliente deve pertanto non solo essere in grado di individuare e neutralizzare rapidamente un attacco in corso, ma anche garantire la continuità operativa durante e dopo l'incidente, minimizzandone l'impatto negativo.

La capacità di identificare attacchi in tempo reale è un aspetto cruciale. Sistemi avanzati di monitoraggio basati sull'IA possono analizzare continuamente flussi di dati provenienti da satelliti, stazioni di controllo e reti di comunicazione. Algoritmi di ML possono identificare schemi di com-

portamento sospetti, come un aumento anomalo del traffico dati o accessi non autorizzati ai sistemi di controllo, attivando allarmi immediati (rilevamento precoce). Una volta rilevato un attacco, i sistemi di difesa possono isolare automaticamente le componenti compromesse, evitando che il problema si propaghi ad altre parti della rete (isolamento automatico). Questo è essenziale nel contesto spaziale, dove le comunicazioni con la Terra possono subire ritardi.

La resilienza non si limita a identificare gli attacchi ma include anche la capacità di mitigare rapidamente i loro effetti. I sistemi di difesa avanzati possono automaticamente implementare percorsi di comunicazione alternativi o utilizzare algoritmi di ridondanza per garantire che le informazioni critiche raggiungano la loro destinazione. Inoltre, tecniche come la segmentazione delle reti e il controllo granulare degli accessi possono limitare il raggio d'azione degli attacchi, proteggendo le componenti più sensibili delle infrastrutture spaziali.

I sistemi di difesa basati sull'IA devono essere progettati per essere dinamici e adattabili, caratteristiche indispensabili in un ambiente in costante evoluzione come quello spaziale. Un approccio basato su *feedback loop* consente di supportare l'apprendimento continuo e l'adattamento in tempo reale: l'IA analizza gli attacchi precedenti, identifica le vulnerabilità e adatta le strategie di difesa per prevenire minacce future. Inoltre, durante un attacco, l'IA

può modificare le regole di difesa in base al comportamento dell'attaccante, implementando nuove barriere o modificando la configurazione dei sistemi.

Un sistema resiliente deve anche prevedere gli attacchi. Grazie al ML i sistemi di difesa possono analizzare grandi quantità di dati per identificare segnali deboli di possibili minacce emergenti.

Questo approccio proattivo consente di riconoscere attività sospette prima che si trasformino in attacchi completi, come tentativi di *phishing* avanzati o l'introduzione di *malware* nei sistemi. Conoscere le tendenze di attacco consente di aggiornare costantemente i protocolli di sicurezza e rafforzare le difese nelle aree più vulnerabili.

Per garantire la massima resilienza, è necessario utilizzare tecnologie di crittografia resistenti anche agli attacchi più sofisticati, come quelli basati su algoritmi quantistici, condividere informazioni sulle minacce e le vulnerabilità tra agenzie spaziali, autorità preposte e operatori governativi e commerciali per creare un fronte comune contro gli attacchi informatici. In particolare, anche nel settore spaziale dove la durata di una missione può essere di diversi anni, è particolarmente rilevante sviluppare algoritmi resistenti agli attacchi di computer quantistici in prospettiva futura. La *Post-Quantum Cryptography* (PQC), infatti, consiste proprio nell'aumentare la resistenza agli attacchi quantistici mirando a proteggere dati e comunicazioni in ottica futuristica, ovvero quando i computer quantistici saranno molto più potenti di oggi.



Recovery post-attacco

Il *recovery* post-attacco rappresenta una fondamentale misura per garantire la continuità delle operazioni e limitare i danni. Il primo passo consiste nel garantire che i dati compromessi o persi siano recuperati in modo rapido e sicuro. Sistemi di *backup* distribuiti, magari posizionati in diverse stazioni terrestri o su satelliti ridondanti, sono essenziali per garantire l'integrità dei dati critici anche in caso di compromissione di una parte del sistema. Una volta ripristinati i dati, i sistemi devono sincronizzarsi automaticamente con il resto delle infrastrutture, per garantire che tutte le componenti lavorino su dati aggiornati e coerenti. L'IA può stabilire un ordine di priorità per il ripristino delle funzionalità, dando precedenza alle operazioni più critiche, come le comunicazioni di emergenza o il controllo dell'assetto dei satelliti. È anche importante generare report dettagliati che possano essere condivisi con altri operatori per migliorare la preparazione futura contro minacce simili.

Nel *recovery* moderno, i sistemi apprendono dagli attacchi le tecniche utilizzate dagli aggressori (*analisi post mortem*) in modo da migliorare le loro capacità future. Le comunicazioni sono un elemento essenziale da ripristinare dopo un attacco poiché costituiscono il canale principale per il coordinamento delle operazioni. In tale ambito, tecniche specifiche includono l'utilizzo di canali crittografati e protocolli sicuri per ristabilire le comunicazioni tra satelliti e stazioni terrestri.

Nel contesto spaziale, l'automazione e l'autonomia per il ripristino delle operazioni sono elementi essenziali non solo per un *recovery* efficace riducendo al minimo il tempo di reazione, ma anche considerando che spesso non è possibile intervenire fisicamente sui sistemi compromessi. I sistemi spaziali devono essere progettati per funzionare in modo autonomo anche in presenza di danni significativi, garantendo un livello base di operatività fino al completo ripristino.

In tale contesto, il *self-healing* rappresenta senz'altro una delle innovazioni più promettenti per la *cybersecurity* spaziale. Questi sistemi utilizzano tecnologie avanzate per minimizzare i tempi di inattività. Le loro principali caratteristiche includono: diagnosi autonoma, riparazioni automatiche e riconfigurazione dinamica. In caso di danni irreparabili, il sistema può riconfigurare le risorse rimanenti per garantire che le operazioni continuino senza interruzioni. Per garantire l'efficacia delle strategie di *recovery*, è necessario effettuare test regolari e simulazioni realistiche di attacchi. Questi test permettono anche di formare il personale in modo che sia in grado di intervenire manualmente, in caso di situazioni impreviste.

Nel settore spaziale, dove ogni minuto è prezioso, l'efficacia del *recovery* è un fattore determinante per il successo delle missioni e la sicurezza globale.

Cenni su normative e possibili modelli di governance globale

Il 1° agosto 2024 è entrato in vigore il Regolamento (UE) 2024/1689 del Parlamento europeo e del Consiglio del 13 giugno 2024 che stabilisce regole armonizzate sull'IA e modifica i regolamenti (CE) n. 300/2008, (UE) n. 167/2013, (UE) n. 168/2013, (UE) n. 2018/858, (UE) 2018/1139 e (UE) 2019/2144 e le direttive 2014/90/UE, (UE) 2016/797 e (UE) 2020/1828 (c.d. *AI Act*)¹⁰. Si tratta della prima legislazione di questo tipo al mondo e può fissare uno *standard* globale per la regolamentazione dell'IA. Il Regolamento mira a promuovere lo sviluppo e l'adozione di sistemi di IA sicuri e affidabili in tutto il mercato unico dell'UE; al tempo stesso, punta a garantire il rispetto dei diritti fondamentali dei cittadini dell'UE e a stimolare gli investimenti e l'innovazione nell'IA in Europa. Il regolamento sull'IA prevede esenzioni, ad esempio per i sistemi utilizzati esclusivamente per scopi militari e di difesa, nonché a fini di ricerca.

The AI ACT – the main principles ¹¹

Il Regolamento classifica i diversi tipi di IA in funzione del rischio. I sistemi di IA che presentano solo un rischio limitato sarebbero soggetti ad obblighi di trasparenza molto leggeri, mentre quelli ad alto rischio sarebbero soggetti a una serie di requisiti e obblighi per accedere al mercato dell'Unione Europea. Sistemi di IA, quali ad esempio la manipolazione comportamentale cognitiva e il punteggio sociale, saranno vietati dall'UE in quanto il loro rischio è ritenuto inaccettabile. Il regolamento vieta inoltre l'uso dell'IA per attività di polizia predittiva basate sulla profilazione e su sistemi che utilizzano dati biometrici per classificare le persone sulla base di specifiche categorie, quali la razza, la religione o l'orientamento sessuale.

¹⁰ Regolamento (UE) 2024/1689

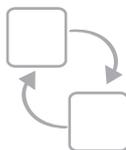
¹¹ European AI Office - Webinar on Risk management logic of the AI Act and related standards



Enhanced Product regulation: risks to health, safety and fundamental rights



AI system and risks that may be generated by an AI system: is the focus of the requirements for high risk



Risk-based and lifecycle approach: regulate according to risk, pre and post-market monitoring

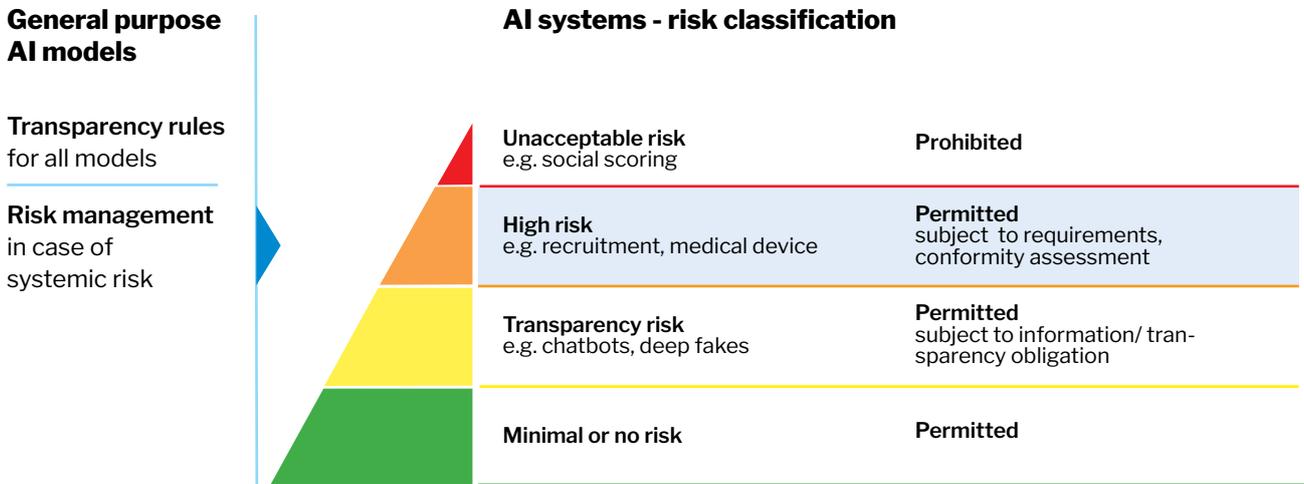


Trust across entire value chain: rules for AI systems and GPAI models



Responsible innovation: encourage the development of trustworthy and human-centric AI

The AI Act – Risk based approach¹²



Il Regolamento inizierà ad applicarsi 24 mesi dopo l'entrata in vigore, salvo per quanto riguarda i divieti relativi a pratiche vietate (che si applicheranno a partire da sei mesi dopo l'entrata in vigore), i codici di buone pratiche (nove mesi dopo), le norme sui sistemi di IA per finalità generali, compresa la *governance* (12 mesi) e gli obblighi per i sistemi ad alto rischio (36 mesi).

La nuova regolamentazione prevede altresì un'architettura di *governance* che impone ad ogni Stato membro la designazione di un'autorità nazionale di vigilanza e che istituisce diversi organi direttivi a livello europeo:

- un ufficio per l'IA¹³ all'interno della Commissione per far rispettare le regole comuni in tutta l'UE;
- un gruppo di esperti scientifici indipendenti a sostegno delle attività di esecuzione;
- un comitato per l'IA¹⁴ composto da rap-

presentanti degli Stati membri e incaricato di fornire consulenza e assistenza alla Commissione e agli Stati membri ai fini di un'applicazione coerente ed efficace del regolamento sull'IA;

- un forum consultivo per i portatori di interessi volto a fornire competenze tecniche al comitato per l'IA e alla Commissione.

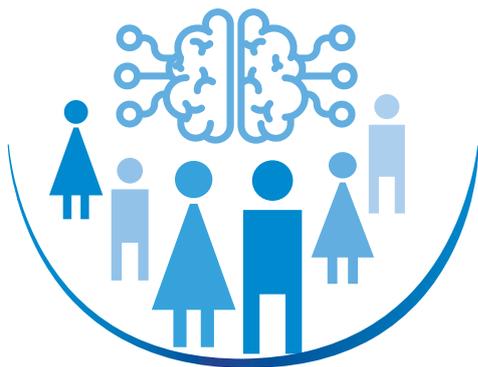
¹² Ibidem

¹³ European AI Office - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/policies/ai-office>

¹⁴ European AI Board - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/policies/ai-board>

L'Ufficio per l'IA

L'Ufficio garantirà l'attuazione coerente della legge sull'IA, sostenendo gli organi di governance degli Stati membri. L'Ufficio per l'IA applicherà inoltre direttamente le norme per i modelli di IA per finalità generali e, in cooperazione con gli sviluppatori, la comunità scientifica e gli altri portatori di interessi, coordinerà l'elaborazione di codici di buone pratiche, condurrà prove e valutazioni dei modelli di IA per finalità generali e applicherà sanzioni, ove necessario.



Il Comitato per l'IA

Il Comitato per l'IA contribuirà a coordinare e garantire la cooperazione tra gli Stati membri dell'UE, anche attraverso le autorità nazionali competenti responsabili dell'applicazione del regolamento. Il Comitato fornirà altresì consulenza e assistenza nell'attuazione della legge sull'IA, anche discutendo orientamenti, progetti di atti delegati e di esecuzione.

La strategia italiana per l'Intelligenza Artificiale 2024-2026

A pochi giorni dalla pubblicazione dell'*AI Act* sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, il Dipartimento per la trasformazione digitale della Presidenza del Consiglio dei ministri e l'Agenzia per l'Italia Digitale hanno reso disponibile *on line* il documento integrale della Strategia Italiana per l'IA 2024-2026¹⁵. Il documento riflette l'impegno del Governo – profuso anche come Presidente di turno del G7 – nel creare un ambiente in cui l'IA possa svilupparsi in modo sicuro, etico e inclusivo, massimizzando i benefici e minimizzando i potenziali effetti avversi; dopo un'analisi del contesto globale e del posizionamento italiano, il documento definisce le azioni strategiche, raggruppate in quattro macroaree: Ricerca, Pubblica Amministrazione, Imprese e Formazione. La strategia propone, inoltre, un sistema di monitoraggio della relativa attuazione e un'analisi del contesto regolativo che traccia la cornice entro cui dovrà essere dispiegata. Il documento sottolinea, tra l'altro, come gli investimenti sull'IA dovranno interessare tutte le aree e i possibili ambiti di applicazione, ponendo tuttavia particolare attenzione a quelli che hanno un ruolo prominente nel tessuto produttivo e sociale italiano; in particolare, per

quanto attiene all'uso dell'IA per rafforzare la competitività del nostro Paese, i settori di particolare interesse per sviluppare e promuovere l'utilizzo di nuove soluzioni di IA, sia in ambito di ricerca applicata, sia in ambito di soluzioni aziendali, sono rappresentati dall'industria del Made in Italy, con particolare attenzione all'identità manifatturiera e alle filiere dell'automazione, dell'agroalimentare, dell'arredo, dell'abbigliamento, nonché quelli del turismo, chimico e farmaceutico, e dell'aerospazio.

Verso una governance globale dell'IA : la "Dichiarazione di Parigi"

Il 10 e 11 febbraio 2025 si è tenuto a Parigi il Vertice per l'Azione sull'IA. A conclusione del Summit, l'Eliseo ha diffuso il documento conclusivo intitolato "Dichiarazione sull'IA Inclusiva e Sostenibile per le Persone e il Pianeta"¹⁶. Il documento, nel quale i Paesi firmatari (tra i quali non figurano Stati Uniti e Regno Unito) prendono atto, tra l'altro, degli sforzi e delle discussioni legate agli enti internazionali in cui viene esaminata la *governance* dell'IA, richiama il *Global Digital Compact*¹⁷ adottato dall'Assemblea generale delle Nazioni Unite nel settembre del 2024 e ribadisce la volontà dei partecipanti di avviare un dialogo globale sulla *governance* dell'IA e di armonizzare l'attuale *governance* degli sforzi, garantendone la complementarità ed evitando duplicazioni.

Il Piano europeo "InvestAI"

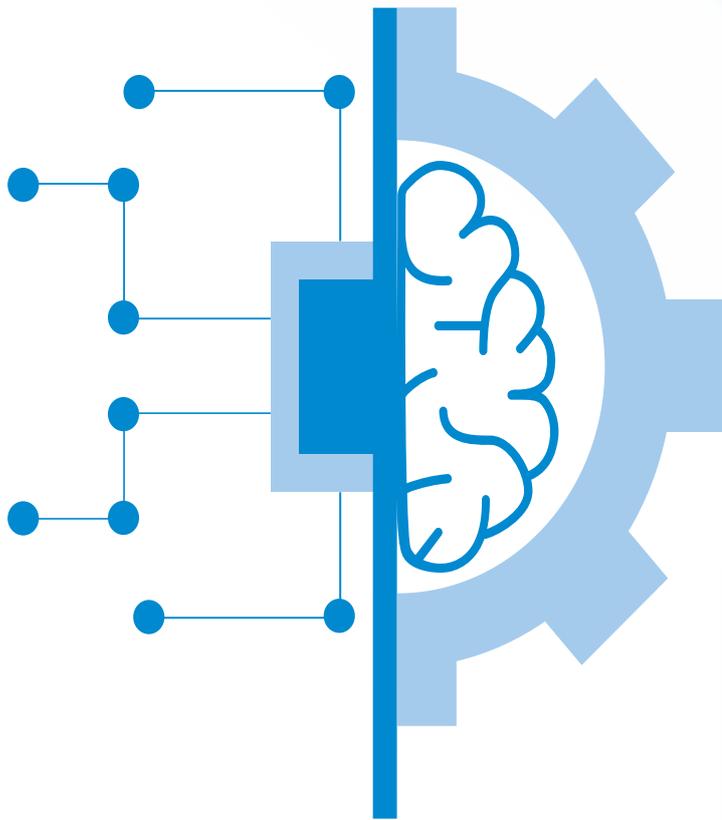
In occasione del *Summit* di Parigi la Presidente della Commissione europea, Ursula von der Leyen, ha lanciato "InvestAI"¹⁸, un'iniziativa per mobilitare 200 miliardi di euro per investimenti nell'IA, compreso un nuovo fondo europeo di 20 miliardi di euro per le *gigafactory* di IA. Le nuove *gigafactory* saranno specializzate nell'addestramento dei modelli di IA più complessi e di grandi dimensioni. A tal fine, le *gigafactory* disporranno di circa 100.000 *chip* di IA di ultima generazione, circa quattro volte di più rispetto alle fabbriche di IA attualmente in fase di creazione. Le *gigafactory* finanziate attraverso "InvestAI" saranno la più grande *partnership* pubblico-privata al mondo per lo sviluppo di un'IA affidabile e serviranno il modello europeo di innovazione cooperativa e aperta, con particolare attenzione alle applicazioni industriali complesse e *mission-critical*.

¹⁵ Dipartimento per l'Innovazione Digitale – <https://assets.innovazione.gov.it/1721376223-01-strategia-italiana-per-l-intelligenza-artificiale-2024-2026.pdf> – Luglio 2024

¹⁶ Statement on Inclusive and Sustainable Artificial Intelligence for People and the Planetec.europa.eu/it/policies/ai-office

¹⁷ United Nations - Global Digital Compact

¹⁸ European Commission - InvestAI



Conclusioni

L'IA rappresenta uno strumento in grado di aumentare la capacità del dominio spaziale e di favorire la competitività e lo sviluppo della *Space Economy*.

In particolare, attraverso le applicazioni di IA sarà possibile migliorare i servizi satellitari nei campi di osservazione della Terra, biomedicina, applicazioni scientifiche; sarà possibile rendere più sicure le telecomunicazioni satellitari; sarà inoltre possibile utilizzare le tecnologie di apprendimento automatico al fine di mitigare i rischi connessi alle operazioni spaziali.

Nei capitoli precedenti sono state eviden-

ziate le opportunità che l'IA offre per migliorare la progettazione e lo sviluppo di satelliti, gli standard di operatività e conseguentemente l'efficienza delle operazioni spaziali e dei servizi in orbita, sia dal punto di vista delle prestazioni che sotto il profilo della sicurezza, sia in ambito civile che militare. Le tecnologie di IA possono, infatti, stimolare lo sviluppo di nuove soluzioni, prodotti ed applicazioni, rappresentando quindi un'opportunità per la formazione di nuove realtà industriali. Di pari passo, affinché le applicazioni di IA siano efficaci e affidabili, è particolarmente rilevante, soprattutto nei contesti ad alto valore strategico ed economico, garantire un livello di difesa e sicurezza che sia in grado di evitare alterazioni degli algoritmi con evidenti potenziali ricadute catastrofiche.

Infatti, i possibili vantaggi derivanti dalle tecnologie di IA nel settore spaziale non sono esenti da rischi che potrebbero derivare da usi impropri. Per questa ragione le istituzioni internazionali sono impegnate nel definire un quadro normativo affinché l'attuazione dei progetti di IA nel settore spaziale non diventi una minaccia per la cittadinanza o uno strumento di pressione geopolitica. L'attribuzione delle responsabilità delle decisioni attraverso la realizzazione di strumenti e capacità che siano in grado di individuare e monitorare comportamenti malevoli o sistemi poco robusti alle minacce intenzionali, unitamente a un quadro regolatorio condiviso anche su base internazionale, assume progressivamente rilevanza per un adeguato controllo degli algoritmi di *Machine Learning/Deep Learning* e dei sistemi spaziali dotati di sempre maggiore autonomia.

Acronimi:

ASI – Agenzia Spaziale Italiana
CE – Comunità Europea
CIMON - Crew Interactive MOBILE Companion
CNN - Reti Neurali Convolutionali
ECG - Elettrocardiogramma
ESA – European Space Agency
EVA – Extravehicular Activity
FDIR - Fault Detection, Isolation and Recovery
GAN - Reti Generative Antagoniste
IA – Intelligenza Artificiale
ISS - Stazione Spaziale Internazionale
LEO – Low Earth Orbit
ML – Machine Learning
NASA - National Aeronautics and Space Administration
NLP - Natural Language Processing
RF - Radiofrequenza
RSO - Resident Space Objects
SAR - Synthetic Aperture Radar
SSA - Space Situational Awareness
SWOT - Strength, Weakness, Opportunity e Threats
UE – Unione Europea

Crediti immagini

NASA, ESA, Shutterstock

Bibliografia:

1. Alibay, F., & Krishnamurthy, S. (2019). Artificial Intelligence for Spacecraft Navigation and Control: A Survey. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 56(4), 1235-1247.
2. Ni, Y., & Gupta, I. (2020). Autonomous Satellite Control Systems Enabled by Machine Learning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(5), 3219-3228.
3. Bendett, S., & Kania, E. B. (2020). Artificial Intelligence for Space Operations and Autonomy. *MIT Technology Review, Special Issue on Space Operations*, 45-52.
4. Chien, S., & Davies, A. (2021). AI in the Space Domain: Innovations and Challenges. *AI Magazine*, 42(2), 25-36.
5. NASA Jet Propulsion Laboratory (2022). The Role of AI in Autonomous Space Systems. White Paper Series, NASA JPL.
6. Lam, R., & Hagan, M. T. (2023). Intelligent Satellites: The Role of AI in Autonomous Spacecraft Management. *Journal of Space Missions and Control*, 47(1), 101-119.
7. Angeletti, P., et al. (2021). AI-Powered Assistance in Long-Duration Space Missions: A Case Study on the ISS. *Space Operations Journal*, 35(3), 317-332.
8. European Space Agency (ESA). (2023). Machine Learning for Satellite Navigation and Collision Avoidance. *ESA Research Publication*, 58-66.
9. R. Saruthirathanaworakun et al., "The Application of Artificial Intelligence in Spectrum Management and the Analytics of Frequency Data Using Big Data Technology" in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 144122-144149, 2024
10. **Regolamento (UE) 2024/1689**
11. European AI Office - **Webinar on Risk management logic of the AI Act and related standards**
12. Ibidem
13. European AI Office - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/policies/ai-office>
14. European AI Board - <https://digital-strategy.ec.europa.eu/it/policies/ai-board>
15. Dipartimento per l'Innovazione Digitale – <https://assets.innovazione.gov.it/1721376223-01-strategia-italiana-per-l-intelligenza-artificiale-2024-2026.pdf> – Luglio 2024
16. **Statement on Inclusive and Sustainable Artificial Intelligence for People and the Planet**
17. United Nations - **Global Digital Compact**
18. European Commission - **InvestAI**



Orizzonti
La collana editoriale
a cura del
Consiglio Tecnico
Scientifico di ASI