

# L'intelligenza artificiale nello spazio: un catalizzatore dello sviluppo della New Space Economy

di Marco Lisi

Questo articolo indaga l'intersezione dell'Intelligenza Artificiale (IA) con l'economia spaziale e le sue profonde implicazioni geopolitiche. L'intelligenza artificiale sta alimentando sempre più le missioni spaziali, le reti satellitari e l'utilizzo delle risorse, rimodellando così il panorama globale dell'industria spaziale. I progressi guidati dall'intelligenza artificiale stanno alimentando le opportunità economiche e la concorrenza tra le nazioni nei settori legati allo spazio e i conseguenti effetti geopolitici. Dai servizi satellitari all'esplorazione lunare e marziana, l'IA è pronta a diventare una forza trainante nel plasmare l'equilibrio di potere nell'arena spaziale, rendendola un argomento critico per i responsabili politici, gli strateghi e i leader del settore.

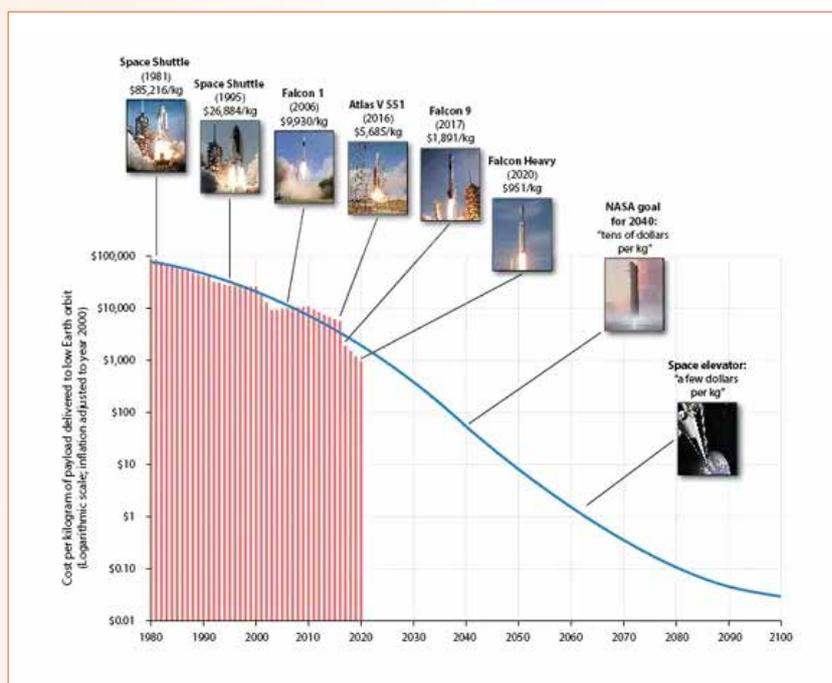


Fig. 1 - Costo per chilogrammo di carico utile consegnato in orbita terrestre bassa (Fonte: FutureTimeline.net, 2018).

L'Intelligenza Artificiale sta giocando un ruolo essenziale nell'aprire un nuovo panorama alle attività spaziali, quella che viene comunemente definita "New Space Economy". Questa tecnologia si è integrata perfettamente in vari aspetti delle attività spaziali, diventando un catalizzatore per un cambiamento senza precedenti nell'economia spaziale. Le nazioni, le organizzazioni e le industrie sfruttano sempre più l'intelligenza artificiale per migliorare le operazioni satellitari, elaborare i "big data" raccolti dallo spazio, migliorare la progettazione dei veicoli spaziali e rivoluzionare

l'esplorazione spaziale. Allo stesso tempo, l'IA introduce dinamiche geopolitiche che stanno profondamente rimodellando il panorama geopolitico delle attività spaziali.

## La nuova economia spaziale

La New Space Economy (NSE), nota anche come Spazio 4.0, è un termine che si riferisce alla commercializzazione e alla democratizzazione dell'esplorazione spaziale. Si tratta di colmare il divario tra l'esplorazione spaziale e gli investimenti in capitale di rischio, in modo che questa nuova economia apra opportunità per i soggetti privati di investire e fare affari

nelle attività spaziali. Tradizionalmente, l'esplorazione spaziale era appannaggio delle agenzie spaziali governative, alimentata dalle ambizioni delle superpotenze e guidata dal perseguimento della conoscenza scientifica, ma gli ultimi decenni hanno visto uno spostamento verso una maggiore commercializzazione. Questo cambiamento è in gran parte guidato dai progressi tecnologici che hanno ridotto i costi di accesso allo spazio e ridotto le dimensioni e la massa dei satelliti (piccoli, micro e nano satelliti, o CubeSat), rendendo fattibile la partecipazione delle aziende private.

A titolo di esempio, negli ultimi anni i costi per i lanci in orbita terrestre bassa (LEO) sono scesi da 65.000 dollari al chilogrammo a 1.500 dollari al chilogrammo (in dollari del 2021), una diminuzione superiore al 95%.

Questa drastica riduzione dei costi è andata di pari passo con l'emergere di nuovi fornitori di lanci commerciali (ad esempio, SpaceX) che danno priorità all'efficienza e hanno sviluppato componenti riutilizzabili per i veicoli di lancio.

Per quanto riguarda l'hardware, la progettazione assistita da computer, la stampa 3D e altre innovazioni (tra cui la stessa intelligenza artificiale) hanno contribuito alla riduzione dei costi semplificando il processo di produzione e migliorando le catene di approvvigionamento. Sono ben noti alcuni esempi notevoli di successo e di innovazione tecnologica aventi come protagonisti aziende private.

SpaceX (Space Exploration Technologies Corp.), fondata da Elon Musk, è un pioniere del settore aerospaziale privato

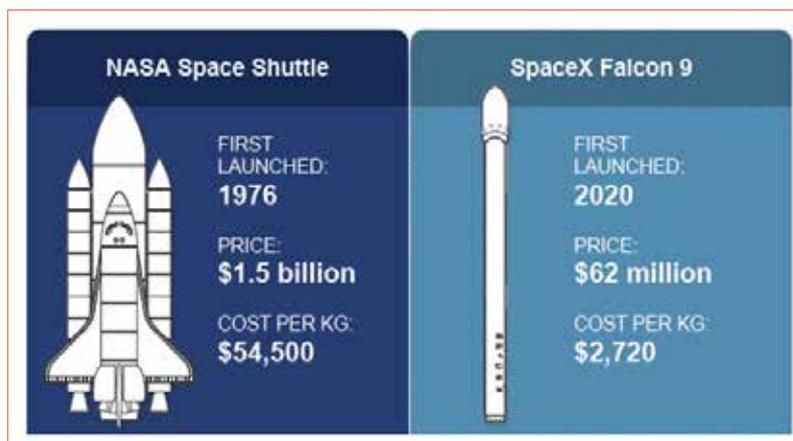


Fig. 2 - Riduzione dei costi di lancio con lanciatori riutilizzabili (Fonte: <https://www.eversana.com/insights/a-spacex-philosophy-to-launching-in-pharma/>). Fig. 2 - Riduzione dei costi di lancio con lanciatori riutilizzabili (Fonte: <https://www.eversana.com/insights/a-spacex-philosophy-to-launching-in-pharma/>).

e una società di trasporto spaziale. È nota per i suoi razzi Falcon e Starship, la navicella spaziale Dragon e lo sviluppo della costellazione di satelliti Starlink per la copertura Internet a banda larga globale. SpaceX ha raggiunto traguardi significativi, come il primo veicolo spaziale finanziato privatamente a raggiungere l'orbita, il primo veicolo spaziale finanziato privatamente ad attraccare alla Stazione Spaziale Internazionale (ISS) e la prima

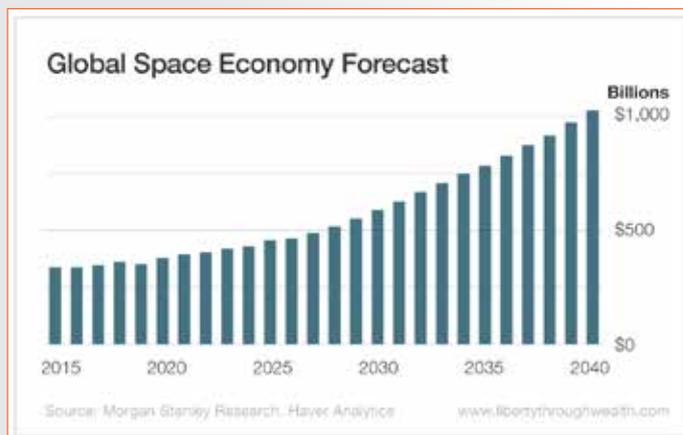
azienda privata a lanciare astronauti nello spazio.

Un concorrente in qualche modo diretto di SpaceX è Blue Origin, fondata da Jeff Bezos, un produttore aerospaziale privato e una società di servizi di volo spaziale. Si concentra sullo sviluppo di tecnologie missilistiche riutilizzabili per ridurre i costi di accesso allo spazio. Il razzo suborbitale New Shepard di Blue Origin è progettato per il turismo spaziale, mentre il suo razzo



Fig. 3 - Due booster riutilizzabili Falcon Heavy di SpaceX effettuano un atterraggio simultaneo dopo aver lanciato il primo razzo Falcon Heavy in orbita il 6 febbraio 2018 (Fonte: SpaceX.com).

Fig. 4 - Previsione di crescita del mercato della Space Economy.



orbitale New Glenn è destinato al lancio di satelliti commerciali e ad altre missioni.

Un'altra società coinvolta nel turismo spaziale è Virgin Galactic, fondata da Sir Richard Branson, che mira a fornire voli spaziali suborbitali per i clienti paganti, consentendo loro di sperimentare l'assenza di gravità e vedere la curvatura della Terra.

Due aziende, tra le tante, che si occupano rispettivamente di telecomunicazioni e Osservazione della Terra: OneWeb e Planet Labs. OneWeb è una società di comunicazioni globale focalizzata sulla costruzione di

una costellazione di satelliti in orbita terrestre bassa (LEO) per fornire servizi Internet ad alta velocità e bassa latenza. L'obiettivo è colmare il divario digitale e offrire connettività in regioni remote e scarsamente servite. OneWeb ha lanciato finora numerosi satelliti come parte della sua rete a banda larga, ed è probabilmente il concorrente più diretto della costellazione Starlink di SpaceX.

Planet Labs è specializzata nell'imaging della Terra attraverso la sua flotta di piccoli satelliti. Questi CubeSat catturano immagini ad alta risoluzione della superficie

terrestre, rendendole disponibili a pagamento a tutti i potenziali utenti. L'azienda mira a creare una mappa "vivente" della Terra aggiornata quotidianamente. La NSE sta assistendo a un'espansione globale, con un numero record di paesi e attori commerciali che investono in programmi spaziali. L'aumento dell'interesse è evidente dal fatto che i satelliti di oltre 80 nazioni sono ora registrati in orbita.

Questo crescente interesse per le attività spaziali sta stimolando investimenti economici che si estendono oltre le infrastrutture spaziali tradizionali, con ricadute su molti settori dell'economia mondiale. Secondo un rapporto del 2022, il valore della nuova economia spaziale è di almeno 469 miliardi di dollari, per lo più generati abilitando o migliorando le attività sulla Terra, ma un valore futuro significativo potrebbe derivare da funzioni che si svolgono interamente in orbita, come la manutenzione in orbita, la ricerca e lo sviluppo, la produzione e l'estrazione di minerali dagli asteroidi. Le opportunità economiche all'interno della space economy si stanno espandendo in modo esponenziale. Al centro di queste opportunità ci sono i servizi satellitari. I satelliti, sia in orbita terrestre bassa che in orbita geostazionaria, sono diventati strumenti indispensabili per le telecomunicazioni, le trasmissioni televisive, il posizionamento globale e l'osservazione della Terra. Consentono connessioni Internet ad alta velocità in regioni remote, forniscono dati meteorologici in tempo reale e facilitano la navigazione di precisione.

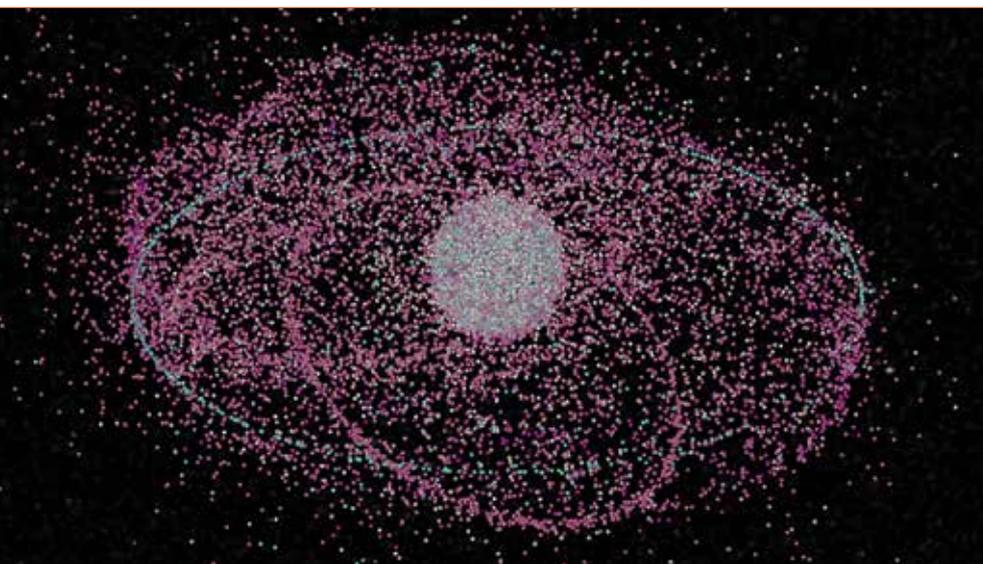


Fig. 5 - L'incredibile quantità di oggetti spaziali che circondano il pianeta (Fonte: HPC Wire, 2022).

I dati e le immagini satellitari hanno rivoluzionato settori come l'agricoltura, la silvicoltura e la gestione dei disastri. Offrono approfondimenti sui cambiamenti ambientali, sulla salute delle colture e sulla gestione delle risorse, rendendoli strumenti preziosi per i responsabili delle decisioni di tutto il mondo. I vantaggi economici di tali servizi sono sostanziali, offrendo una migliore efficienza e allocazione delle risorse, riducendo al contempo costi e rischi. Anche l'industria spaziale commerciale si sta avventurando nel turismo spaziale, con aziende che sviluppano attivamente l'infrastruttura per offrire viaggi suborbitali e, in futuro, orbitali, ai turisti spaziali. Il turismo spaziale rappresenta un mercato nascente ma potenzialmente redditizio, con il potenziale di rendere lo spazio più accessibile a una gamma più ampia di persone.

Uno degli aspetti chiave della NSE è la democratizzazione dello spazio. In passato, solo una manciata di paesi aveva le risorse e la tecnologia per intraprendere missioni spaziali. Oggi una gamma molto più ampia di attori, tra cui le economie emergenti, le aziende private e persino gli individui, possono contribuire all'esplorazione spaziale. Ciò ha portato a un aumento del numero di satelliti in orbita, sonde spaziali verso pianeti lontani e piani per missioni con equipaggio sulla Luna e su Marte e la creazione di avamposti permanenti nello spazio e nelle colonie fuori dalla Terra.

Una caratteristica essenziale della New Space Economy è la collaborazione internazionale:

governi e industrie private si uniscono per sviluppare e commercializzare tecnologie spaziali, con l'obiettivo comune di fare affari. Queste partnership portano a investimenti, tecnologie e opportunità condivise. Gli sforzi congiunti sono essenziali non solo per la condivisione dei costi, ma anche per sfruttare le competenze e le esperienze collettive. Tale collaborazione promuove anche la diplomazia nella governance spaziale, poiché le nazioni cercano di creare un ambiente spaziale stabile e prevedibile per le attività economiche. L'NSE presenta anche diverse sfide, come la quantità di detriti spaziali in orbita attorno alla Terra, che secondo la NASA è ora nell'ordine di 9.000 tonnellate. I detriti spaziali, a causa del crescente numero di satelliti in orbita attorno alla Terra e dell'avvento delle cosiddette "Mega Costellazioni", potrebbero rappresentare una minaccia sia per i veicoli spaziali con equipaggio che per quelli senza equipaggio.

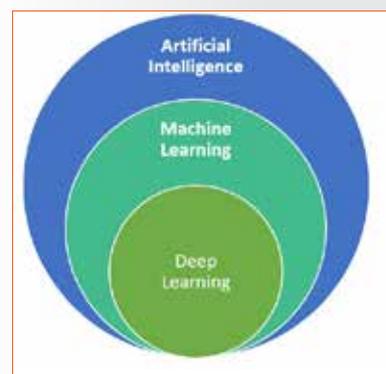


Fig. 6 - Intelligenza Artificiale, machine learning e Deep Learning (Fonte: Nadia Berchane, M2 IESCI 2018).

Altre potenziali questioni da considerare sono legali e normative, in quanto l'attuale quadro politico e giuridico internazionale non è stato progettato tenendo conto della NSE.

Nel contesto della New Space Economy, l'Intelligenza Artificiale sta emergendo come un catalizzatore chiave per le future attività spaziali. L'unione dell'intelligenza artificiale e dell'esplorazione spaziale sta aprendo nuovi orizzonti, accelerando l'innovazione e migliorando l'efficienza delle missioni spaziali.

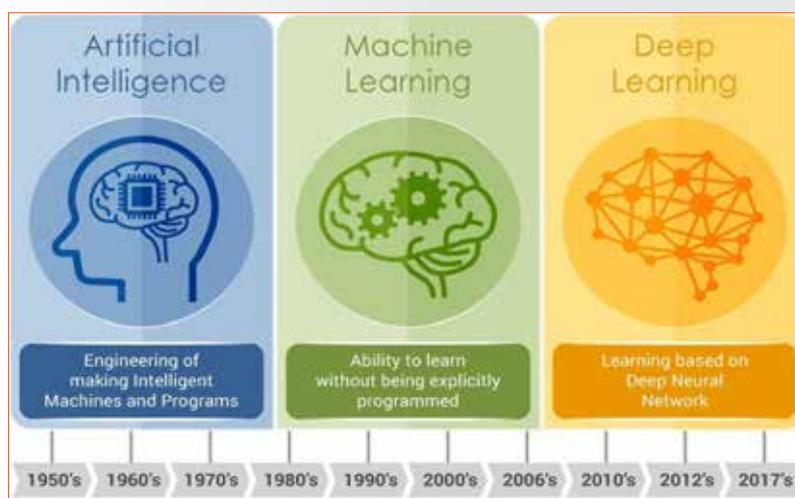


Fig. 7 - Evoluzione dell'IA (Fonte: <https://www.embedded-vision.com/>)

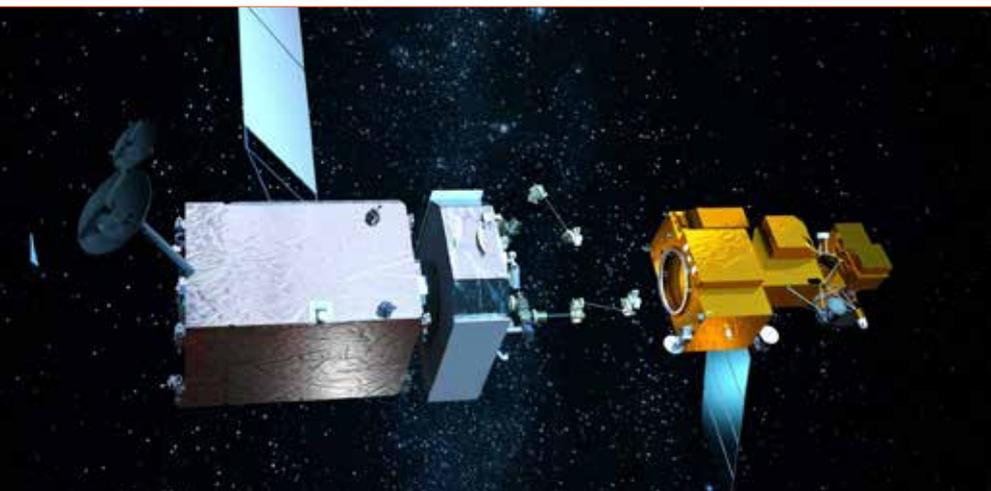


Fig. 8 - Veicolo spaziale robotico OSAM-1 (On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 1) basato sull'intelligenza artificiale (Fonte: NASA).

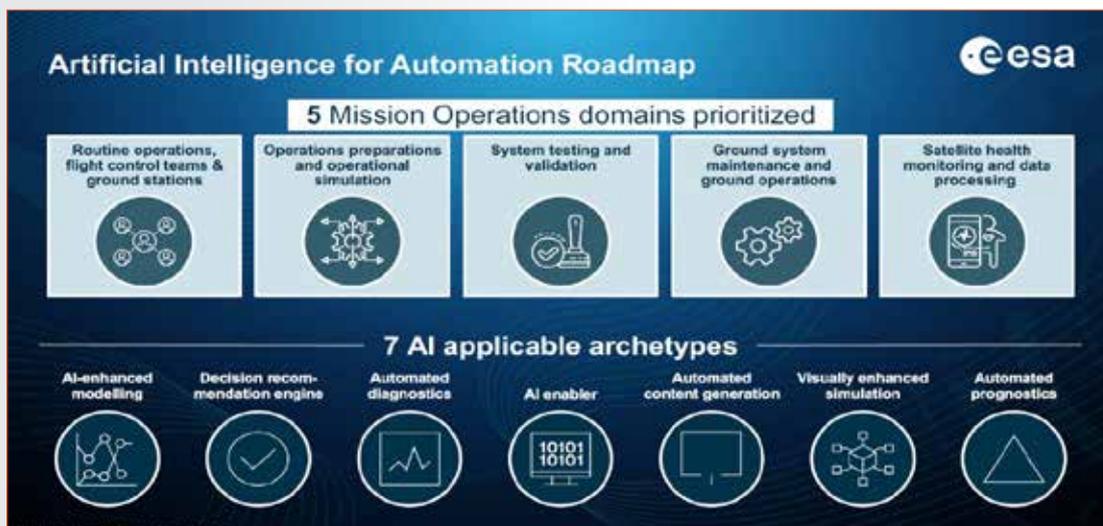
**Intelligenza artificiale**

Prima di descrivere il ruolo dell'Intelligenza Artificiale, è utile fornire alcune definizioni di base e concordare una tassonomia comune. L'intelligenza artificiale (IA) si riferisce allo sviluppo di sistemi informatici o software in grado di eseguire compiti che simulano le funzioni cognitive umane e si adattano a diverse situazioni, il che richiede tipicamente l'intervento umano. L'IA come disciplina non è nuova e la ricerca su di essa si è sviluppata nel corso di più di

cinquant'anni. Il primo approccio all'IA è stato quello dei Rule-Based Systems (definiti anche Expert Systems), sistemi che operano su regole e logiche predefinite, ovvero istruzioni esplicite, per prendere decisioni ed eseguire compiti. Per superare i limiti dei Sistemi Esperti, principalmente la necessità di un set di definizioni molto dettagliato ed esaustivo per ogni dominio di applicazione, è stato sviluppato un approccio più flessibile ed evoluto, il Machine Learning (ML). Il machine learning prevede

l'addestramento di un modello attraverso dati reali per sviluppare modelli e fare previsioni o decisioni senza essere esplicitamente programmato. La fase di addestramento può essere supervisionata, cioè con l'intervento umano, o non supervisionata. Un sottoinsieme del Machine Learning e della sua ulteriore evoluzione è il Deep Learning (DL). DL utilizza reti neurali con più livelli (reti neurali profonde) per analizzare e apprendere dai dati. Nella rete neurale, le due fasi di addestramento dai dati e della definizione del modello avvengono contemporaneamente, a scapito però di una maggiore potenza di calcolo, di un set più ampio di dati di input e di un periodo di apprendimento più lungo. Rispetto ai sistemi esperti, gli approcci di Machine Learning (e Deep Learning) richiedono meno struttura: semplificando eccessivamente, inseriamo i dati nella macchina e vediamo quali informazioni essa ottiene. In altre parole, gli algoritmi di Machine Learning hanno una caratteristica peculiare: superano il paradigma di

Fig. 9 - Tabella di marcia dell'ESA per l'applicazione dell'IA alle operazioni delle missioni spaziali (Fonte: ESA).



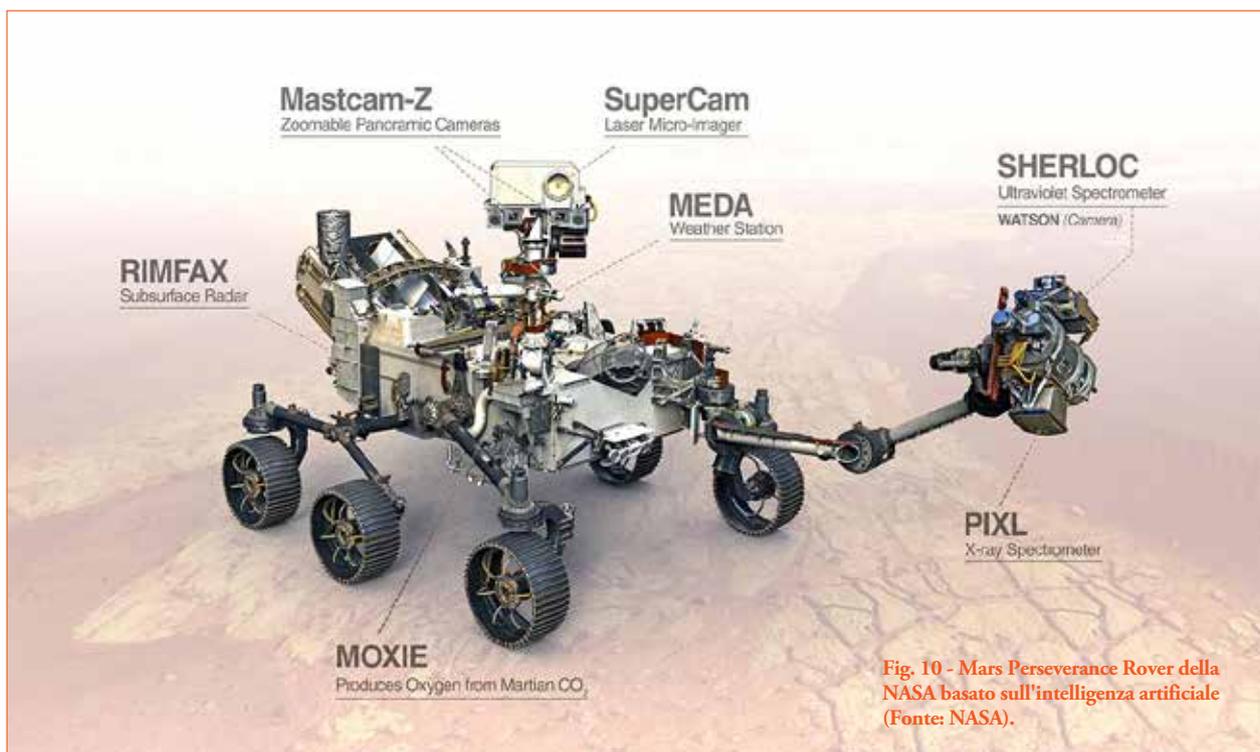


Fig. 10 - Mars Perseverance Rover della NASA basato sull'intelligenza artificiale (Fonte: NASA).

programmazione standard poiché il programmatore non deve pensare a tutte le eventualità in cui la macchina può trovarsi per farla agire in situazioni diverse. La macchina viene, invece, addestrata e quindi diventa capace di adattarsi da sola a diversi contesti, acquisendo una certa autonomia e mostrando alcuni comportamenti che assomigliano all'intelligenza di un essere umano.

Le applicazioni dell'IA stanno esplodendo in vari settori, tra cui sanità, finanza, istruzione, sicurezza, produzione e altro ancora.

Tuttavia, se da un lato l'IA presenta enormi opportunità per l'innovazione e l'efficienza, dall'altro solleva anche preoccupazioni etiche e sociali, come gli effetti del mercato del lavoro, i pregiudizi negli algoritmi e i problemi di privacy.

### L'IA nello spazio: abilitare l'economia spaziale

La sinergia dinamica tra IA e space economy è evidente principalmente in cinque diversi settori:

1. operazioni e comunicazioni satellitari;
2. robotica ed esplorazioni spaziali;
3. analisi dei dati in tempo reale e off-line;
4. progettazione, collaudo e approvvigionamento di veicoli spaziali;
5. sicurezza.

Nei sottoparagrafi seguenti ogni singolo settore verrà analizzato nel dettaglio.

#### *Operazioni e comunicazioni satellitari basate sull'IA (1)*

L'intelligenza artificiale sta dotando i satelliti della capacità di gestire autonomamente vari compiti, dalle regolazioni dell'orbita alla prevenzione delle collisioni e alla trasmissione dei dati.

L'intelligenza artificiale ha

rivoluzionato le operazioni satellitari, rendendole più agili, adattabili e resilienti. I processi decisionali autonomi sono al centro di questa trasformazione. I satelliti sono ora dotati di algoritmi di intelligenza artificiale che consentono loro di eseguire una moltitudine di compiti con un intervento umano minimo, ad esempio regolazioni dell'orbita, prevenzione delle collisioni e gestione delle risorse. Gli algoritmi decisionali autonomi consentono ai veicoli spaziali di identificare gli ostacoli, adattarsi a sfide impreviste e navigare nei complessi campi gravitazionali dei corpi celesti. Questo livello di autonomia riduce la necessità di una supervisione e di un intervento umano costanti, consentendo missioni più ambiziose ed economiche. Particolarmente efficace è l'adozione dell'IA nell'ottimizzazione della traiettoria. Nello spazio, ogni

goccia di propellente è importante.

Gli algoritmi di intelligenza artificiale considerano più variabili, come le forze gravitazionali, la dinamica orbitale e gli obiettivi della missione, per calcolare i percorsi più efficienti in termini di consumo di propellente.

I rischi della missione sono sostanzialmente ridotti aumentando il livello di conoscenza della situazione intorno al veicolo spaziale. Le tecniche di intelligenza artificiale utilizzate per fondere i dati provenienti da più sensori, come telecamere, radar e spettrometri, possono identificare potenziali collisioni con altri veicoli spaziali o detriti spaziali, fornendo allarmi precoci. Un cambio di paradigma è necessario anche quando si considerano le operazioni a terra: mentre la miniaturizzazione della tecnologia ha già consentito una significativa riduzione del costo del segmento spaziale, il costo del segmento di terra non scala con le dimensioni e la massa del satellite. Ancora una volta, l'intelligenza artificiale può semplificare i sistemi di terra e ridurre il numero di

operatori dedicati e altamente qualificati, che lavorano a turni 24 ore su 24, 7 giorni su 7.

Il risultato è un'infrastruttura spaziale che opera in modo efficiente anche negli scenari più complessi e dinamici. Inoltre, l'IA migliora la spina dorsale stessa delle reti di comunicazione spaziale. La velocità e l'efficienza con cui i dati vengono trasmessi tra la Terra e lo spazio sono aumentate negli ultimi anni, anche grazie all'adozione di tecnologie avanzate, come le comunicazioni ottiche. Gli algoritmi di intelligenza artificiale ottimizzano la ricezione del segnale, regolano i modelli del fascio in tempo reale e allocano le risorse di comunicazione in modo intelligente. Ciò garantisce che le velocità di trasmissione dati siano massimizzate, che la latenza sia ridotta al minimo e che la comunicazione rimanga affidabile, anche in caso di interferenze o condizioni ambientali mutevoli. Questo livello di sofisticazione della comunicazione è fondamentale per consentire non solo l'osservazione della Terra e la ricerca scientifica, ma anche servizi critici come le previsioni meteorologiche e la connettività Internet globale.

*Progressi nell'esplorazione spaziale*

*guidati dall'IA (2)*

Nel campo dell'esplorazione spaziale, i contributi dell'IA sono impressionanti.

L'esplorazione spaziale richiede livelli molto elevati di autonomia e automazione. Il controllo remoto completo dalla Terra è difficile se non impossibile da ottenere, a causa dei rigidi vincoli di comunicazione: finestre di comunicazione limitate, lunghe latenze di comunicazione e larghezza di banda limitata. Ad esempio, un segnale radio impiega dai 5 ai 20 minuti per percorrere la distanza tra Marte e la Terra, a seconda delle posizioni dei pianeti. L'intelligenza artificiale consente ai veicoli spaziali di gestire compiti di routine e prendere decisioni senza una comunicazione costante con la Terra, riducendo così la dipendenza dalla comunicazione.

Le esplorazioni dello spazio profondo possono essere di tre tipi:

1. prevedibili (ma spesso estremamente complesse);
2. imprevedibili;
3. che richiedono una risposta in tempo reale.

La navigazione autonoma, abilitata da algoritmi di intelligenza artificiale, consente ai veicoli spaziali di navigare lontano dalla Terra, atterrare su corpi celesti e affrontare e adattarsi a situazioni inaspettate con un alto grado di sicurezza. Le missioni robotiche beneficiano dell'intelligenza artificiale, in quanto consente ai rover e ai lander di esplorare autonomamente le superfici planetarie, eseguendo compiti complessi come la raccolta e l'analisi di campioni. Questi



Fig. 11 - Deep learning per le immagini satellitari (Fonte: Deepsense.ai).

robot utilizzano l'intelligenza artificiale per l'analisi del terreno, il riconoscimento degli oggetti e la navigazione, consentendo loro di prendere decisioni in base all'ambiente circostante.

Inoltre, l'analisi dei dati basata sull'intelligenza artificiale accelera il processo di scoperta scientifica, poiché setaccia l'enorme volume di dati raccolti durante le missioni e aiuta gli scienziati a decifrare i fenomeni cosmici.

L'intelligenza artificiale ha lasciato il segno anche nell'ambito dell'utilizzo delle risorse e della sostenibilità. Attraverso l'utilizzo delle risorse in situ (ISRU), l'IA svolge un ruolo fondamentale nell'estrazione e nell'elaborazione delle risorse sui corpi celesti, sbloccando potenzialmente una grande quantità di risorse per future missioni sulla Luna, su Marte e oltre. Questo è fondamentale per sostenere l'esplorazione umana a lungo termine e gli sforzi di colonizzazione nello spazio.

Il concetto di utilizzo delle risorse in situ (ISRU) è in prima linea in questi sviluppi. La robotica e le tecnologie minerarie basate sull'intelligenza artificiale sono pronte a rivoluzionare l'estrazione delle risorse sui corpi celesti, fornendo potenzialmente le materie prime necessarie per l'esplorazione umana a lungo termine e l'abitazione. La Luna e Marte, con la loro abbondanza di risorse, sono obiettivi primari per l'ISRU.

### *Intelligenza artificiale e analisi dei dati spaziali (3)*

L'Intelligenza Artificiale mostra tutto il suo potenziale come strumento per l'elaborazione e l'analisi dei dati di

telerilevamento satellitare.

L'osservazione satellitare della Terra era già fortemente basata su tecniche di elaborazione digitale delle immagini per analizzare i dati, ad esempio da sensori ottici o radar ad apertura sintetica (SAR), ma la fotointerpretazione, la fase a maggior valore aggiunto del processo, era ancora il regno dell'esperienza umana fino a pochi anni fa.

Le tecniche di IA rendono fattibile un'efficace "Data Integration and Fusion", ovvero l'integrazione di dati provenienti da più sensori satellitari e la combinazione di dati satellitari con osservazioni da terra o altre fonti, migliorando l'accuratezza e la pertinenza delle informazioni estratte dalle immagini satellitari.

L'elaborazione dei dati satellitari con tecniche di AI permette un'estrazione più efficiente e accurata delle informazioni e un'analisi dei dati quasi in tempo reale, aprendo nuove applicazioni in diversi campi, quali:

- Riconoscimento e classificazione delle immagini, in cui gli algoritmi di intelligenza artificiale vengono impiegati per identificare e classificare oggetti, caratteristiche e modelli nelle immagini di osservazione della Terra, compresa l'identificazione automatica dei tipi di copertura del suolo, delle aree urbane, della vegetazione, dei corpi idrici e dei cambiamenti nel tempo;
- Change and Anomaly Detection, ovvero il rilevamento dei cambiamenti nella superficie terrestre nel tempo. Confrontando immagini satellitari o altri dati di osservazione della Terra in momenti diversi, i

modelli di apprendimento automatico possono identificare cambiamenti come la deforestazione, l'espansione urbana, i cambiamenti nell'uso del suolo, gli effetti di disastri naturali o identificare eventi come fuoriuscite di petrolio, incendi o condizioni ambientali anomale che potrebbero richiedere un'attenzione immediata;

- Land Cover Mapping, per creare mappe dettagliate della copertura del suolo e dell'uso del suolo. Gli algoritmi di intelligenza artificiale possono classificare i tipi di copertura del suolo nelle immagini satellitari, distinguendo tra categorie come foreste, aree urbane, corpi idrici e terreni agricoli. Queste informazioni sono fondamentali per il monitoraggio ambientale, la gestione delle risorse, l'uso del territorio e la pianificazione urbana, la gestione dei trasporti e il monitoraggio delle attività umane. Inoltre, le stesse tecniche aiutano a rilevare e analizzare i cambiamenti dell'ambiente nel tempo, come la deforestazione, l'espansione urbana o le alterazioni dei corpi idrici;
- Monitoraggio delle colture e agricoltura di precisione: in questo caso l'AI viene applicata nel monitoraggio e nella gestione delle attività agricole. I dati satellitari e dei droni, combinati con algoritmi di apprendimento automatico, consentono l'agricoltura di precisione fornendo informazioni sulla salute delle colture, prevedendo i raccolti e ottimizzando l'allocazione delle risorse;
- Atmospheric and Climate Research, dove l'IA viene utilizzata nell'analisi dei dati atmosferici e climatici ottenuti dai satelliti di osservazione

della Terra, consentendo così un monitoraggio ambientale efficace e reattivo.

### **Intelligenza artificiale e progettazione, test e procurement di veicoli spaziali**

L'IA estende la sua influenza sulla progettazione e sul collaudo dei veicoli spaziali e sull'approvvigionamento di parti attraverso la rete dei subappaltatori, contribuendo ad aumentare l'efficienza, l'economicità e l'innovazione. Il design generativo, basato su algoritmi di intelligenza artificiale, può esplorare numerose possibilità di progettazione e ottimizzare i componenti dei veicoli spaziali in base a obiettivi e vincoli predefiniti. Ad esempio, applicata alle strutture dei veicoli spaziali, l'IA può ottimizzarne la progettazione, migliorando l'integrità strutturale e riducendo al minimo il peso e i costi. La simulazione basata sull'intelligenza artificiale viene utilizzata per simulare e modellare aspetti distinti della progettazione di veicoli spaziali, come l'analisi termica, l'integrità strutturale, la compatibilità elettromagnetica (EMC) e l'aerodinamica. Ciò consente agli ingegneri di prevedere e ottimizzare il comportamento del veicolo spaziale in varie condizioni. Più in generale, l'IA semplifica lo sviluppo di "Digital Twins", modelli digitali sofisticati e completi che possono essere utilizzati per simulare il comportamento di un veicolo spaziale in una missione fuori Terra nella sicurezza e nel comfort di un centro di controllo missione. Una fase essenziale, ma tradizionalmente lunga e costosa, del processo di sviluppo

di un veicolo spaziale è quella del collaudo e della validazione. L'ambiente commerciale competitivo della New Space Economy richiede che i prodotti siano sul mercato al momento giusto e al giusto prezzo. Per raggiungere questo obiettivo, sono necessarie riduzioni dei tempi di sviluppo e implementazione.

D'altra parte, la realizzazione di grandi costellazioni satellitari per comunicazioni mobili o multimediali richiede la produzione di molti veicoli spaziali in un tempo notevolmente breve. I concetti tradizionali per la produzione spaziale non sono più adeguati a soddisfare le esigenze di questi progetti innovativi.

È necessario un cambio di paradigma nel modo in cui i satelliti sono progettati e prodotti, con l'obiettivo di fornire un prodotto migliore e più flessibile, a costi inferiori e in tempi più brevi (il time-to-market la fa da padrone).

Per quanto riguarda i metodi di assemblaggio, integrazione e collaudo/verifica (AIT/AIV), è richiesto uno stile di produzione in catena di montaggio, insieme a impianti di produzione espressamente progettati per la produzione di massa.

Qui l'intelligenza artificiale viene in soccorso, contribuendo all'automazione dei processi di test, consentendo la valutazione rapida e completa dei componenti e dei sistemi dei veicoli spaziali. Ciò include test funzionali, stress test e test delle prestazioni, garantendo l'affidabilità prima del lancio. Inoltre, durante i test, l'IA può identificare anomalie o comportamenti imprevedibili nei sistemi dei veicoli spaziali. Questo rilevamento precoce aiuta gli ingegneri a risolvere prontamente i problemi

e migliora l'affidabilità complessiva del veicolo spaziale. L'IA viene applicata in modo efficace all'evoluzione dei sottosistemi a bordo di un oggetto spaziale (ad esempio, un satellite). Un esempio rappresentativo è quello dei sistemi di monitoraggio autonomi dei veicoli spaziali. I sistemi di monitoraggio dello stato di salute (HM) dei veicoli spaziali, noti anche come sistemi FDIR (Fault, Detection, Isolation and Recovery), sono essenziali per raggiungere gli obiettivi di disponibilità, affidabilità e sicurezza del veicolo spaziale.

La tecnologia precedente si basava su Expert Knowledge, verificando se i valori di telemetria rientravano nei limiti predefiniti o si allontanavano al di fuori di essi (tecnica "Out-of-Limits", OOL).

Rispetto ai sistemi esperti, l'FDIR basato sull'intelligenza artificiale è in grado di apprendere continuamente da nuovi dati ed esperienze, migliorando le capacità di rilevamento e ripristino dei guasti nel tempo. L'intelligenza artificiale può integrare la conoscenza del dominio e le regole degli esperti con i nuovi dati raccolti durante la vita operativa e quindi utilizzare il ragionamento diagnostico per determinare la causa principale di un guasto. Ciò può essere particolarmente utile nei sistemi complessi in cui la relazione tra sintomi e cause principali non è sempre semplice.

### **Intelligenza artificiale e sicurezza dei sistemi spaziali**

L'IA svolge un ruolo significativo nel migliorare la sicurezza dei sistemi spaziali. Con l'evolversi della tecnologia, i sistemi spaziali stanno diventando sempre più complessi, interconnessi e

vulnerabili a varie minacce. Le tecnologie spaziali, con il loro ruolo nella localizzazione e nella temporizzazione, nel telerilevamento e nelle comunicazioni, sono essenziali per la fornitura di servizi digitali in tutto il mondo e vitali per le prestazioni e la sopravvivenza delle nostre infrastrutture critiche. Per questi motivi i sistemi spaziali devono essere garantiti e protetti da attacchi intenzionali e non intenzionali, in termini di riservatezza, disponibilità, integrità, continuità e qualità del servizio. La convergenza tra difesa e spazio era già tra i temi più dibattuti in tutto il mondo. La guerra in Ucraina ha drammaticamente dimostrato in tutte le sue evidenze che le preoccupazioni e le disposizioni in materia di sicurezza devono essere estese a tutte le risorse spaziali. La percezione comunemente condivisa è che lo Spazio rischia di diventare lo scenario di una guerra futura, se non lo è già diventata. Oltre agli attacchi informatici, diretti principalmente contro le infrastrutture del segmento di terra (centri di controllo, stazioni di terra di controllo, strutture di lancio), sono oggi possibili diverse minacce fisiche, che vanno dalle "armi anti-satellite ad energia cinetica" alle "armi ad energia diretta" e al disturbo delle radiofrequenze. Un'arma cinetica antisatellite può essere un missile lanciato dalla terra nello spazio fino a intercettare un satellite già in orbita e distruggerlo per impatto, oppure un satellite "killer" che viene messo in orbita e rimane lì in attesa di essere utilizzato, modificando la sua orbita. In entrambi i casi, un attacco ad "energia cinetica", basato sull'impatto fisico con un

satellite "bersaglio" e sulla sua distruzione, è seguito anche dall'inevitabile conseguenza della produzione di "detriti", che continuano a rimanere in orbita, aumentando la già preoccupante quantità di detriti spaziali intorno alla Terra. Le armi a energia diretta sono solitamente rivolte contro mezzi in orbita e possono essere realizzate come raggi laser o a radiofrequenza ad alta energia generati a terra, in grado di "accecare" i satelliti e danneggiare le loro apparecchiature elettroniche. "Lampi" distruttivi di energia a radiofrequenza possono anche essere generati dall'esplosione di piccole bombe nucleari nella ionosfera ("Electro-Magnetic Pulse", EMP). L'integrazione dell'IA nella sicurezza dei sistemi spaziali potrebbe diventare essenziale per garantire la resilienza e la protezione di questi sistemi contro un'ampia gamma di minacce intenzionali e non intenzionali, tra cui attacchi informatici, accessi non autorizzati, attacchi fisici e rischi ambientali.

Un'area chiave in cui l'IA può fornire un miglioramento sostanziale è quella del rilevamento e dell'analisi delle minacce. Gli algoritmi di intelligenza artificiale possono analizzare set di dati di grandi dimensioni per identificare anomalie o modelli insoliti che potrebbero indicare una minaccia alla sicurezza. Ciò è particolarmente importante per rilevare accessi non autorizzati o potenziali attacchi informatici ai sistemi spaziali. Inoltre, i sistemi di intelligenza artificiale sono in grado di riconoscere i modelli associati ad attività dannose, aiutando a rilevare e rispondere agli incidenti di sicurezza in modo più rapido ed efficace. Per quanto riguarda la sicurezza informatica, gli algoritmi di intelligenza artificiale aiutano a identificare le vulnerabilità all'interno del software e dell'infrastruttura di rete del sistema spaziale. Ciò consente di adottare misure proattive per affrontare potenziali debolezze prima che possano essere sfruttate. L'intelligenza artificiale viene utilizzata anche

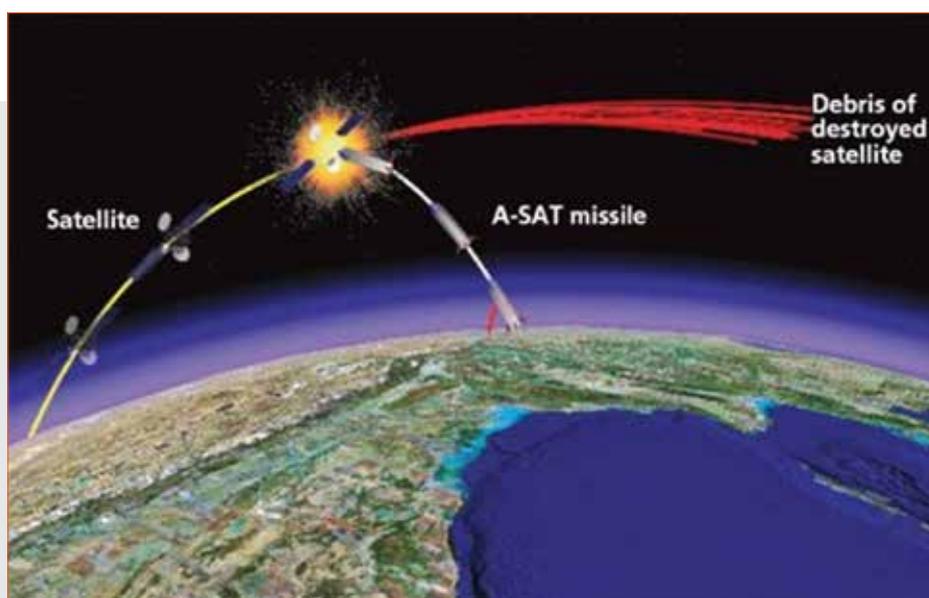


Fig. 12 - Attacco fisico cinetico ad ascesa diretta anti-satellite (A-SAT) (Fonte: Centro Studi Strategici e Internazionali).

per sviluppare sistemi avanzati di rilevamento e prevenzione delle intrusioni, in grado di identificare e neutralizzare gli attacchi informatici in tempo reale.

Per quanto riguarda il segmento spaziale, l'IA migliora innanzitutto la Space Situational Awareness. Come già accennato, l'IA è in grado di tracciare in modo efficiente gli oggetti spaziali, prevedendone le traiettorie e identificando potenziali collisioni o anomalie. Questo è fondamentale per prevenire collisioni in ambienti orbitali affollati, ma anche potenziali "attacchi cinetici". Più in generale, i sistemi di IA di bordo possono essere programmati per rispondere in modo autonomo alle minacce, riducendo al minimo i tempi di risposta ed il rischio di errore umano. Questi sistemi possono adattarsi alle minacce in evoluzione imparando e aggiornando continuamente i loro meccanismi di difesa. Questa adattabilità è essenziale per stare al passo con le sofisticate minacce informatiche.

Un ultimo, ma non meno importante, contributo dell'IA

alla sicurezza spaziale è il suo contributo allo sviluppo di protocolli di comunicazione sicuri, tecniche di crittografia e meccanismi di autenticazione per proteggere l'integrità e la riservatezza dei dati trasmessi tra i sistemi spaziali.

L'IA può essere impiegata per sviluppare e migliorare algoritmi di crittografia, comprese tecniche crittografiche avanzate, e per stabilire sistemi di gestione delle chiavi adattando dinamicamente le chiavi di crittografia, rendendo così più difficile per gli avversari compromettere la sicurezza dei canali di comunicazione satellitare.

#### Conclusioni

Da quanto presentato finora, è evidente come l'IA abbia il potenziale per impattare radicalmente sul futuro delle attività spaziali e per diventare un potente catalizzatore di profondi cambiamenti geopolitici nell'economia spaziale.

Man mano che le nazioni sfruttano sempre più le capacità dell'IA per l'esplorazione spaziale, le operazioni

satellitari e gli sforzi strategici, si sono aperte nuove opportunità di competizione, collaborazione e innovazione, rafforzando ulteriormente il progresso della New Space Economy.

È probabile che le nazioni con capacità avanzate di intelligenza artificiale ottengano un vantaggio strategico, non solo nell'esplorazione del cosmo, ma anche nel garantire i loro interessi nazionali attraverso capacità spaziali potenziate. La confluenza dell'IA e delle tecnologie spaziali sta rimodellando le tradizionali dinamiche di potere e promuovendo una nuova corsa allo spazio in cui l'abilità tecnologica nell'IA potrebbe diventare sinonimo di influenza geopolitica.

Le implicazioni geopolitiche dell'IA sono ancora più evidenti a livello strategico. Man mano che lo spazio diventa sempre più militarizzato, l'importanza strategica di proteggere le risorse spaziali attraverso tecnologie basate sull'intelligenza artificiale diventa di fondamentale importanza. Le nazioni stanno investendo molto nella consapevolezza dell'ambiente spaziale, nella sicurezza informatica e nei sistemi autonomi per proteggere le loro infrastrutture spaziali. Lo sviluppo e la diffusione dell'IA in questo contesto contribuiscono a un crescente dominio della sicurezza nazionale che si estende oltre i confini terrestri.

Insieme ai numerosi vantaggi, l'IA solleva anche molti dubbi e introduce nuovi potenziali rischi, anche nelle attività spaziali.

Il problema principale dei sistemi basati sull'IA è che rischiano di diventare "scatole nere", sistemi di cui possiamo conoscere i dati in input e i



Fig. 13 - Panorama delle minacce dell'IA. (Fonte: Agenzia dell'Unione europea per la cibersicurezza - ENISA).

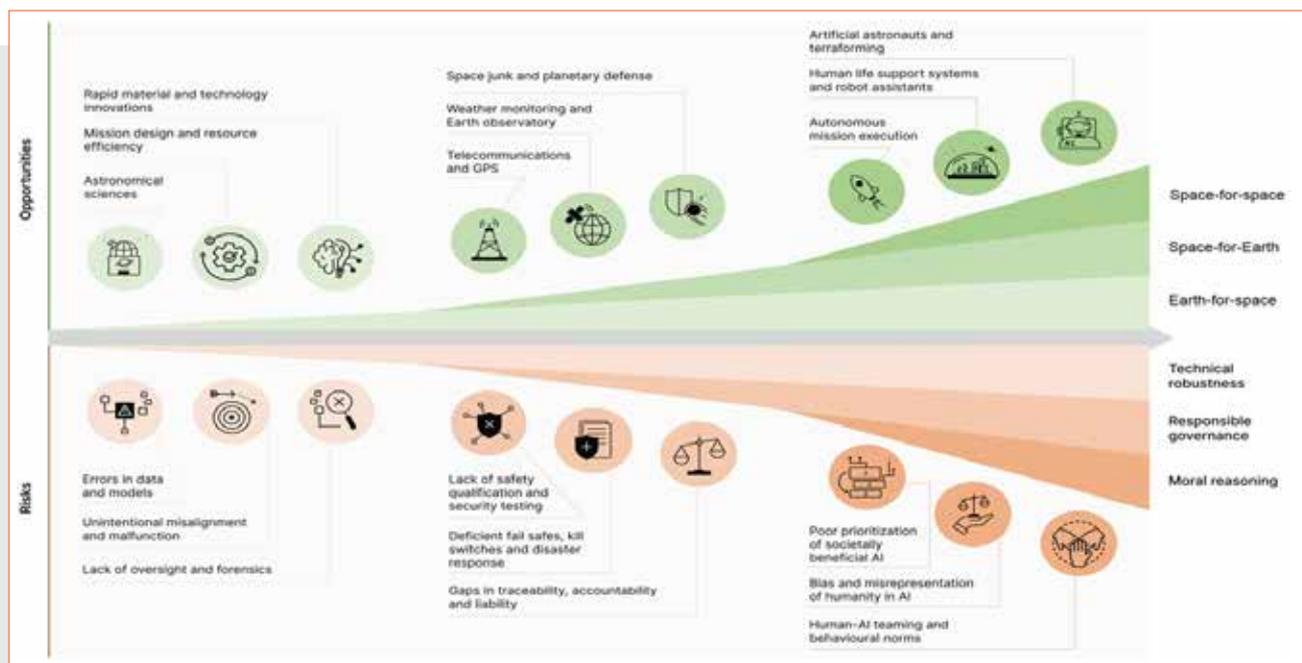


Fig. 14 - L'IA nello spazio: rischi e opportunità (Fonte: *Frontiers*, <https://doi.org/10.3389/frspt.2023.1199547>).

conseguenti risultati o decisioni, con nessuna o poca visibilità sul processo decisionale. In questa situazione, è anche difficile, se non impossibile, convalidare un processo e correggerne gli errori, o migliorarlo, perché la diagnosi di un problema è difficile da eseguire. Di conseguenza, questa mancanza di trasparenza potrebbe ridurre la fiducia nei sistemi basati sull'IA, soprattutto nelle applicazioni, come nello spazio, dove la sicurezza, l'affidabilità e la responsabilità sono essenziali, sollevando problemi etici e normativi. Più in generale, la necessità di spiegabilità nell'IA è fondamentale in tutte le applicazioni in cui le decisioni hanno un impatto sugli individui o sulla società. È per fare un po' di luce sul processo decisionale degli algoritmi di intelligenza artificiale che XAI è in fase di sviluppo. XAI è l'acronimo di Explainable Artificial Intelligence. Si riferisce a un insieme di tecniche e approcci nell'ambito dell'intelligenza artificiale (AI) e

dell'apprendimento automatico (ML) che mirano a rendere i processi decisionali dei sistemi di IA più comprensibili e interpretabili dagli esseri umani. XAI si concentra sullo sviluppo di modelli di IA che producano risultati facilmente comprensibili e interpretati dagli esseri umani, rendendo più trasparente il funzionamento interno del sistema di IA. I futuri quadri normativi spaziali dovranno includere requisiti legali per la trasparenza e la spiegabilità nei processi decisionali, soprattutto quando i sistemi di IA hanno un impatto sulla vita delle persone, pesanti passività economiche e grandi rischi finanziari. In generale, il rischio più elevato associato all'IA deriva dalla sopravvalutazione delle sue potenzialità o dalla loro sottovalutazione. I sistemi di intelligenza artificiale non saranno mai un'alternativa completa al pensiero umano: sono come "sapienti idioti", con capacità e competenze formidabili,

derivanti dall'addestramento e dall'elaborazione di enormi quantità di dati. Cambieranno radicalmente le nostre vite, la nostra società e lo scenario geopolitico, sulla Terra e nello spazio, ma, come ogni altro strumento tecnologico, sta a noi usarli con saggezza e tenerli sotto controllo.

#### KEYWORDS

NEW SPACE ECONOMY; INTELLIGENZA ARTIFICIALE; GEOSPATIAL; SERVIZI; DATI; IMMAGINI SATELLITARI

#### ABSTRACT

This article investigates the intersection of Artificial Intelligence (AI) with the space economy and its profound geopolitical implications. Artificial intelligence is increasingly powering space missions, satellite networks and resource utilization, thereby reshaping the global landscape of the space industry. AI-driven advances are fueling economic opportunities and competition among nations in space-related sectors and the resulting geopolitical effects. From satellite services to lunar and Martian exploration, AI is poised to become a driving force in shaping the balance of power in the space arena, making it a critical topic for policymakers, strategists and industry leaders.

#### AUTORE

MARCO LISI  
INGMARCOLISI@GMAIL.COM