

LA ROBOTICA NEL CAMPO MILITARE

Robotica e Futuro dell'Automazione



(Sostituire con un'immagine pertinente: drone, UGV, ecc.)

Progetto Finale di Tecnologia

Esplorazione di uno degli aspetti principali della robotica

Data di consegna: 28 novembre 2025

Gruppo di lavoro

Autori dell'elaborato

Gruppo di lavoro

Federico Nardullo [Ricerca generale, capitoli 1–2]

Luca Cremaschi [Approfondimenti tecnici, capitoli 2–3]

Niccolò Decano [Pro e contro, capitoli 4–5]

Diego Ripamonti [Revisione, impaginazione, conclusioni]

Classe: [Classe]

Anno scolastico: [20XX/20YY]

Indice

Gruppo di lavoro	2
1 Introduzione	5
1.1 Che cos'è la robotica	5
1.2 Robotica e automazione nel contesto militare	5
1.3 Innovazioni recenti e dibattito sul futuro	6
2 Tecnologie e componenti della robotica militare	7
2.1 Struttura di base di un sistema robotico militare	7
2.2 Sensori nei sistemi militari	7
2.3 Attuatori e sistemi di locomozione	8
2.3.1 Locomozione terrestre	8
2.3.2 Locomozione aerea	8
2.3.3 Sistemi navali e subacquei	9
2.3.4 Manipolatori ed esoscheletri	9
2.4 Sistemi di controllo e livelli di autonomia	9
2.5 Comunicazioni e reti	9
2.6 Robotica militare e Industria 4.0	10
3 Applicazioni della robotica nel campo militare	11
3.1 Veicoli terrestri senza equipaggio (UGV)	11
3.1.1 Neutralizzazione di ordigni esplosivi	11
3.1.2 Ricognizione e sorveglianza terrestre	11
3.1.3 Supporto logistico	11
3.1.4 Sistemi armati su piattaforme terrestri	12
3.2 Droni aerei (UAV)	12
3.2.1 Ricognizione a lunga durata	12
3.2.2 Supporto alle unità sul terreno	12
3.2.3 Impiego come sistema d'arma	12
3.2.4 Munizioni circuitanti e sciami di droni	13
3.3 Robot navali e subacquei	13
3.3.1 Difesa costiera e controllo marittimo	13
3.3.2 Sistemi subacquei	13
3.4 Robot indossabili ed esoscheletri	13
3.5 Robot per addestramento, manutenzione e sanità militare	14
3.5.1 Addestramento	14
3.5.2 Manutenzione e ispezione	14
3.5.3 Sanità militare	14

4 Evoluzione e tendenze future della robotica militare	15
4.1 Dalle prime sperimentazioni ai sistemi attuali	15
4.2 Automazione crescente e intelligenza artificiale	15
4.3 Swarm robotics e sistemi collaborativi	16
4.4 Difesa contro i robot: sistemi anti-drone e sicurezza informatica	16
4.4.1 Sistemi anti-drone	16
4.4.2 Cyber-sicurezza dei sistemi robotici	16
4.5 Scenari futuri	16
5 Pro e contro della robotica nel campo militare	17
5.1 Vantaggi e svantaggi a confronto	17
5.2 Impatti economici e occupazionali	17
5.3 Svantaggi tecnici e rischi operativi	17
5.3.1 Affidabilità e complessità	18
5.3.2 Vulnerabilità a disturbi ed attacchi	18
5.4 Questioni etiche, legali e politiche	18
5.4.1 Distanza psicologica dalla violenza	18
5.4.2 Responsabilità e diritto internazionale umanitario	18
5.4.3 Corsa agli armamenti e proliferazione	19
5.5 Sintesi critica	19
6 Conclusioni	21
A Glossario di termini principali	23
Bibliografia essenziale	25

1 Introduzione

1.1 Che cos'è la robotica

Definizione di robotica

La robotica è la disciplina dell'ingegneria che studia e sviluppa metodi che permettano a un robot di eseguire dei compiti specifici riproducendo in modo automatico il lavoro umano.

In termini generali, un **robot** è una macchina programmabile capace di:

- percepire l'ambiente circostante tramite **sensori**;
- elaborare le informazioni grazie a un'unità di **controllo** o calcolo;
- compiere azioni fisiche tramite **attuatori** (motori, bracci meccanici, sistemi idraulici, ecc.).

Questi tre elementi – sensori, controllo, attuatori – formano l'architettura di base della maggior parte dei sistemi robotici, civili o militari.

1.2 Robotica e automazione nel contesto militare

La robotica è oggi presente in quasi tutti i settori: industria, medicina, trasporti, servizi alla persona, esplorazione spaziale. Uno degli ambiti in cui si è sviluppata più rapidamente è il **settore militare**, dove i robot vengono utilizzati per:

- **ricognizione e sorveglianza** di aree pericolose;
- **supporto logistico** (trasporto materiali, rifornimenti);
- **neutralizzazione di ordigni esplosivi** e mine;
- **difesa aerea e navale**;
- in alcuni casi, come **sistemi d'arma** veri e propri.

Linee guida del progetto scolastico

Questo elaborato segue le indicazioni assegnate:

- analisi degli **aspetti principali della robotica** (tecnologie, applicazioni, evoluzione);
- approfondimento specifico sulla **robotica nel campo militare**;
- valutazione dei **vantaggi e svantaggi**, con attenzione a questioni etiche e legali;
- preparazione di un materiale chiaro, strutturato come un **libro di testo**.

1.3 Innovazioni recenti e dibattito sul futuro

Negli ultimi vent'anni la robotica militare è stata trasformata da tre grandi innovazioni:

1. diffusione di **sistemi senza equipaggio** (droni aerei, terrestri e navali);
2. progressi dell'**intelligenza artificiale** (IA), in particolare nel riconoscimento di immagini e nella pianificazione autonoma del movimento;
3. sviluppo di **reti di comunicazione** sicure e ad alta capacità, che consentono il controllo remoto a grande distanza.

Questi sviluppi hanno moltiplicato le possibilità operative, ma hanno anche alimentato le preoccupazioni sull'avvento dei **sistemi d'arma autonomi letali** (*Lethal Autonomous Weapon Systems*, LAWS): armi capaci di selezionare e ingaggiare un bersaglio senza un controllo umano diretto.

All'interno delle Nazioni Unite è in corso un dibattito su come regolamentare o eventualmente vietare tali sistemi, per garantire il rispetto del **diritto internazionale umanitario**.

Perché studiare la robotica militare?

Capire la robotica nel campo militare significa non solo conoscere sensori e algoritmi, ma riflettere sul rapporto tra tecnologia, politica e responsabilità umana nelle decisioni che riguardano la vita e la morte.

2 Tecnologie e componenti della robotica militare

2.1 Struttura di base di un sistema robotico militare

Indipendentemente dal dominio operativo (terra, aria, mare), un sistema robotico militare comprende normalmente:

- **piattaforma meccanica** (carrello cingolato, drone ad ala fissa, scafo navale, esoscheletro, ecc.);
- **pacchetto sensoriale** (telecamere, radar, lidar, sonar, GPS, sensori inerziali, ecc.);
- **unità di elaborazione** (computer di bordo, microcontrollori, GPU);
- **sistemi di comunicazione** (radio, collegamenti satellitari, reti mesh);
- **sistemi di attuazione** (motori, servocomandi, bracci robotici, sistemi di stabilizzazione);
- **interfaccia uomo–macchina** (console di controllo, visori, tablet, comandi vocali).

Livelli di autonomia

In funzione della quantità di decisioni prese dal robot in autonomia, distinguiamo:

- **teleoperazione**: l'operatore controlla ogni movimento;
- **autonomia assistita**: il robot aiuta in compiti come stabilizzazione ed evitamento ostacoli;
- **autonomia supervisata**: l'umano definisce la missione, il robot pianifica i dettagli;
- **autonomia piena**: il sistema decide in modo indipendente, entro alcuni limiti preimpostati.

2.2 Sensori nei sistemi militari

Panoramica generale

Tipo di sensore	Uso principale in ambito militare
Sensori elettro-ottici	Telecamere nel visibile e nel vicino infrarosso montate su torrette stabilizzate. Utili per sorveglianza, identificazione di bersagli e guida dei veicoli in ambienti complessi.
Sensori termici (IR)	Camere a infrarosso termico che rilevano la radiazione emessa dagli oggetti in funzione della temperatura. Essenziali per operazioni notturne e per individuare persone o veicoli nascosti.
Radar	Usano onde radio per misurare distanza e velocità. Installati soprattutto su droni aerei e mezzi navali per rilevare bersagli anche a grande distanza o in condizioni atmosferiche sfavorevoli.
Lidar	Impiegano impulsi laser per costruire mappe 3D dell'ambiente. Fondamentali per la navigazione autonoma di veicoli terrestri e droni a bassa quota.
GPS e IMU	Il GPS fornisce la posizione assoluta; le unità di misura inerziali (IMU) misurano accelerazioni e rotazioni per stabilizzazione e navigazione quando il segnale GPS non è affidabile.
Sensori chimici e radio-logici	Rilevano agenti chimici, biologici o radioattivi, permettendo di monitorare aree contaminate senza esporre soldati al rischio diretto.

Tabella 2.1: Principali sensori utilizzati nella robotica militare.

2.3 Attuatori e sistemi di locomozione

Gli **attuatori** trasformano i comandi dell'unità di controllo in movimenti o altre azioni.

2.3.1 Locomozione terrestre

I veicoli terrestri senza equipaggio (*Unmanned Ground Vehicles*, UGV) usano soluzioni diverse a seconda del terreno:

- **ruote**, per spostamenti rapidi su strade o superfici relativamente regolari;
- **cingoli**, che offrono maggiore mobilità fuoristrada e capacità di superare ostacoli;
- **zampe robotiche**, ancora sperimentali, per ambienti estremamente irregolari (macerie, rocce, scale).

2.3.2 Locomozione aerea

I droni aerei (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV) si dividono in:

- **multirotore**: molto maneggevoli, possono decollare verticalmente ma hanno autonomia limitata;
- **ad ala fissa**: più efficienti su lunghe distanze e grande autonomia;
- **configurazioni ibride (VTOL)**: combinano decollo verticale e volo orizzontale, unendo i vantaggi delle due categorie precedenti.

2.3.3 Sistemi navali e subacquei

I veicoli di superficie (*Unmanned Surface Vehicles*, USV) e quelli subacquei (*Unmanned Underwater Vehicles*, UUV) utilizzano eliche, timoni e sistemi di controllo della profondità. Alcuni modelli imitano il movimento dei pesci per maggiore silenziosità.

2.3.4 Manipolatori ed esoscheletri

- **Bracci robotici** montati su UGV permettono di maneggiare oggetti pericolosi, come ordigni esplosivi improvvisati (IED), mantenendo la distanza di sicurezza.
- Gli **esoscheletri** sono strutture indossabili che amplificano la forza del soldato e riducono l'affaticamento durante il trasporto di carichi pesanti.

2.4 Sistemi di controllo e livelli di autonomia

Il **sistema di controllo** è il “cervello” del robot.

Tecniche di controllo

- **Controllo classico**: basato su modelli matematici del sistema (es. controllori PID) per stabilizzare il movimento.
- **Pianificazione del percorso**: algoritmi che calcolano il tragitto ottimale evitando ostacoli.
- **Intelligenza artificiale**: reti neurali, apprendimento per rinforzo e altri metodi di IA per riconoscere oggetti, prevedere comportamenti e scegliere strategie.

Livelli di autonomia (riassunto visuale)

Livello	Caratteristiche principali
Teleoperazione	L'operatore invia in tempo reale tutti i comandi. Il robot è essenzialmente un veicolo radiocomandato evoluto.
Autonomia assistita	Il sistema stabilizza il movimento, evita ostacoli, mantiene una rotta o una quota; l'operatore definisce l'obiettivo immediato.
Autonomia supervisata	L'umano assegna missioni di alto livello (es. “sorveglia quest'area”); il robot pianifica percorsi e manovre.
Autonomia piena	Il sistema sceglie da solo come eseguire la missione, con intervento umano minimo o nullo. In ambito d'arma è oggetto di forte dibattito etico.

Tabella 2.2: Livelli di autonomia nei sistemi robotici militari.

2.5 Comunicazioni e reti

Per funzionare efficacemente, i robot militari devono scambiare grandi quantità di dati con stazioni di controllo e con altri sistemi.

- Le comunicazioni avvengono tramite **radio** in varie bande o tramite **collegamenti satellitari**.
- Spesso si usano **reti mesh**, in cui ogni robot funge da nodo che ritrasmette il segnale, estendendo la copertura.

- La **sicurezza informatica** è cruciale: servono crittografia, autenticazione e protezione contro disturbi intenzionali (*jamming*) o manipolazioni del segnale (*spoofing*).

2.6 Robotica militare e Industria 4.0

💡 Dalla fabbrica al campo di battaglia

L'Industria 4.0 descrive la digitalizzazione dei processi produttivi attraverso automazione, Internet delle Cose (IoT), analisi dei dati e intelligenza artificiale. Le stesse tecnologie stanno trasformando anche il settore della difesa, dando vita al concetto di **Difesa 4.0**.

Esempi di questa convergenza:

- **Produzione additiva** (stampa 3D) per realizzare rapidamente pezzi di ricambio o componenti di droni direttamente in teatro operativo.
- **Digital twin** (gemello digitale) per simulare il comportamento di robot e veicoli prima di schierarli in missione.
- **Manutenzione preiddittiva** basata su sensori e analisi dati, che riduce i tempi di fermo dei sistemi.
- Integrazione dei robot in **reti logistiche automatizzate**, simili ai magazzini robotizzati delle grandi aziende civili.

3 Applicazioni della robotica nel campo militare

3.1 Veicoli terrestri senza equipaggio (UGV)

I robot terrestri rappresentano una delle prime forme di robotica militare impiegate in operazioni reali.

3.1.1 Neutralizzazione di ordigni esplosivi

UGV cingolati dotati di bracci manipolatori e telecamere ad alta risoluzione sono utilizzati per:

- ispezionare sospetti ordigni esplosivi improvvisati (IED);
- prelevare e mettere in sicurezza l'ordigno;
- effettuare piccole esplosioni controllate.

Questi sistemi sono normalmente **teleoperati**: l'artificiere rimane in un luogo protetto e controlla il robot tramite monitor e joystick, riducendo enormemente il rischio personale.

3.1.2 Ricognizione e sorveglianza terrestre

Esistono piccoli robot leggeri, talvolta lanciabili a mano, che possono:

- entrare in edifici o tunnel prima dei soldati;
- esplorare grotte o strutture collassate;
- monitorare il perimetro di basi o infrastrutture sensibili.

Grazie a telecamere, microfoni e sensori, essi forniscono informazioni preziose senza esporre le truppe al fuoco nemico.

3.1.3 Supporto logistico

Veicoli terrestri autonomi simili a piccoli camion possono trasportare:

- munizioni e armamenti;
- acqua, viveri e attrezzi;
- materiale medico.

Alcuni prototipi sperimentano il **convoglio autonomo**, in cui più veicoli seguono automaticamente un veicolo guida, riducendo il numero di autisti necessari.

3.1.4 Sistemi armati su piattaforme terrestri

Esistono UGV equipaggiati con torrette armate (mitragliatrici, lanciagranate, ecc.), controllate da remoto. Questi sistemi permettono di sorvegliare e difendere punti sensibili mantenendo il personale a distanza. L'aspetto più controverso riguarda la possibile combinazione tra **autonomia di movimento** e **capacità letale**.

3.2 Droni aerei (UAV)

I droni aerei sono oggi una delle tecnologie militari più conosciute.

3.2.1 Ricognizione a lunga durata

Grandi UAV ad ala fissa possono rimanere in volo per molte ore o giorni, effettuando:

- sorveglianza continua di vaste aree;
- raccolta di immagini e video in tempo reale;
- monitoraggio di confini e rotte marittime.

Sensori elettro-ottici e radar consentono di operare anche di notte o con condizioni meteorologiche sfavorevoli.

3.2.2 Supporto alle unità sul terreno

Droni più piccoli, trasportabili nello zaino, vengono lanciati direttamente dalle squadre sul campo per:

- osservare il terreno oltre colline, boschi o edifici;
- individuare possibili imboscate;
- guidare il tiro di artiglieria o di altri sistemi.

In questo modo si migliora la **consapevolezza situazionale** delle unità e si riduce il rischio di sorprese.

3.2.3 Impiego come sistema d'arma

Alcuni UAV sono in grado di trasportare armamenti guidati di precisione. Di norma:

- l'operatore umano seleziona il bersaglio;
- valuta i possibili danni collaterali;
- autorizza l'impiego dell'arma.

Nel dibattito internazionale si discute fino a che punto sia possibile (o desiderabile) automatizzare parti di questo processo decisionale.

3.2.4 Munizioni circuitanti e sciami di droni

Una tendenza recente è lo sviluppo di **munizioni circuitanti** (*loitering munitions*): piccoli droni che possono sorvolare un'area in attesa e poi colpire un bersaglio identificato.

Parallelamente si studia l'uso di **sciami di droni**, composti da molti piccoli UAV che cooperano autonomamente, ad esempio per:

- saturare le difese aeree nemiche;
- mappare rapidamente un'area;
- confondere i radar avversari.

3.3 Robot navali e subacquei

3.3.1 Difesa costiera e controllo marittimo

I veicoli di superficie senza equipaggio (*USV*) possono:

- pattugliare porti, basi navali e coste;
- identificare imbarcazioni sospette;
- fungere da piattaforme per sonar e altri sensori.

Possono anche essere impiegati per operazioni di **sminamento marittimo**, riducendo il rischio per le navi con equipaggio.

3.3.2 Sistemi subacquei

I veicoli subacquei autonomi (*UUV*) vengono utilizzati per:

- mappare i fondali marini;
- localizzare mine e ordigni subacquei;
- posare o ispezionare cavi e sensori;
- condurre sorveglianza discreta.

La comunicazione sott'acqua è più complessa rispetto all'aria: le onde radio vengono assorbite, quindi si usano segnali **acustici** o **ottici**, con limiti di distanza e velocità di trasmissione.

3.4 Robot indossabili ed esoscheletri

Gli **esoscheletri militari** sono strutture meccaniche indossabili che amplificano i movimenti del corpo:

- migliorano la capacità di trasportare carichi pesanti;
- riducono lo sforzo muscolare e il rischio di infortuni;
- possono integrare armature e sistemi di stabilizzazione.

In prospettiva, alcuni progetti mirano a incrementare ulteriormente velocità, resistenza e capacità di salto del soldato, ma tali sviluppi sono ancora in fase sperimentale e pongono questioni etiche sul cosiddetto "soldato aumentato".

3.5 Robot per addestramento, manutenzione e sanità militare

3.5.1 Addestramento

Simulatori avanzati combinano:

- realtà virtuale e aumentata;
- piattaforme robotiche in movimento;
- modelli fisici di veicoli e armi.

Ciò permette di addestrare il personale a scenari complessi (sbarco, combattimento urbano, ecc.) senza correre rischi reali.

3.5.2 Manutenzione e ispezione

Robot dotati di telecamere e sensori vengono usati per ispezionare:

- fusoliere di aerei;
- scafi di navi;
- veicoli corazzati.

La manutenzione **predittiva**, basata sull'analisi dei dati raccolti in tempo reale, riduce i costi e aumenta la disponibilità dei mezzi.

3.5.3 Sanità militare

In situazioni di combattimento o catastrofi, piccoli robot possono:

- portare medicinali o defibrillatori in zone difficilmente raggiungibili;
- individuare feriti grazie a sensori termici;
- in prospettiva, trasportare i feriti tramite lettighe robotizzate, riducendo l'esposizione del personale sanitario.

4 Evoluzione e tendenze future della robotica militare

4.1 Dalle prime sperimentazioni ai sistemi attuali

L'idea di utilizzare dispositivi a distanza nel combattimento ha radici storiche:

- durante la **Prima** e la **Seconda guerra mondiale** si sperimentarono bombe radiocomandate e veicoli esplosivi teleguidati;
- durante la **Guerra fredda** furono sviluppati droni da ricognizione pilotati a distanza;
- dagli anni 2000 i droni aerei e i robot per la neutralizzazione di ordigni sono entrati stabilmente nelle operazioni militari.

Ogni nuova generazione di sistemi ha portato:

- sensori più affidabili;
- maggiore autonomia di volo o di movimento;
- integrazione più stretta con i sistemi di comando e controllo.

4.2 Automazione crescente e intelligenza artificiale

L'elemento di rottura degli ultimi anni è la diffusione di algoritmi di **intelligenza artificiale** (IA) capaci di:

- riconoscere veicoli, persone e oggetti nelle immagini in tempo reale;
- stimare traiettorie e prevedere il comportamento di altri veicoli o persone;
- scegliere, tra molte opzioni, la manovra più efficace per raggiungere un obiettivo.

💡 Questioni aperte sull'IA militare

- Come evitare errori gravi, ad esempio confondere un civile con un combattente?
- Chi è responsabile in caso di danni causati da una decisione automatica?
- È accettabile, dal punto di vista etico, delegare a una macchina la scelta di impiegare la forza letale?

4.3 Swarm robotics e sistemi collaborativi

La **swarm robotics** studia sciami di robot relativamente semplici che cooperano tra loro, ispirandosi al comportamento di api, formiche o stormi di uccelli.

In ambito militare ciò può significare:

- sciami di micro-droni per saturare le difese aeree;
- gruppi di veicoli terrestri che esplorano in parallelo vaste aree;
- reti di sensori autonomi distribuiti sul territorio.

L'uso operativo di sciami richiede algoritmi di coordinamento complessi e può aumentare il rischio di **perdita di controllo umano**, se non vengono stabilite regole rigorose di supervisione.

4.4 Difesa contro i robot: sistemi anti-drone e sicurezza informatica

Lo sviluppo della robotica militare rende necessario anche difendersi da questi stessi sistemi.

4.4.1 Sistemi anti-drone

Comprendono:

- **sensori di scoperta** (radar, lidar, sensori acustici) per individuare droni di piccole dimensioni;
- **contromisure elettroniche** per disturbare o interrompere i segnali di controllo e di navigazione;
- **soluzioni fisiche**, come proiettili programmabili, reti o droni "cacciatori".

4.4.2 Cyber-sicurezza dei sistemi robotici

Robot e droni, essendo connessi a reti di comunicazione, sono vulnerabili ad attacchi informatici:

- intrusione nel software di controllo;
- manipolazione dei dati dei sensori;
- sabotaggio dei collegamenti radio o satellitari.

La **cyber-sicurezza** diventa quindi una componente essenziale della progettazione e gestione dei sistemi robotici militari.

4.5 Scenari futuri

Osservando le tendenze attuali, si possono ipotizzare alcuni scenari plausibili:

- robot a basso costo diffusi in tutti i reparti per compiti di ricognizione e logistica;
- crescita di sistemi **semi-autonomi**, con esseri umani che mantengono il controllo sulle decisioni più delicate;
- definizione di **standard internazionali** e possibili trattati sui sistemi d'arma autonomi;
- collaborazione sempre più stretta tra industria civile high-tech e settore della difesa.

Il risultato finale dipenderà dalle scelte politiche e sociali dei prossimi anni: la tecnologia apre possibilità, ma non determina da sola come verrà usata.

5 Pro e contro della robotica nel campo militare

5.1 Vantaggi e svantaggi a confronto

👍 Vantaggi

- **Maggiore efficienza e precisione** nelle operazioni: i robot non si stanchano e possono eseguire movimenti estremamente accurati.
- **Riduzione dei rischi** per il personale umano in attività come sminamento, esplorazione di aree contaminate o combattimento urbano.
- **Aumento della produttività** e della prontezza operativa: capacità di operare 24/7, con manutenzione ottimizzata.
- **Nuove capacità operative**: esplorazione di ambienti estremi (profondità marine, zone radioattive) e sorveglianza prolungata di grandi aree.

👎 Svantaggi

- **Potenziale perdita di posti di lavoro** in ambito logistico e di supporto a causa dell'automazione.
- **Complessità e costi elevati** nello sviluppo, nell'acquisizione e nella manutenzione dei robot.
- **Vulnerabilità** a guasti tecnici, disturbi elettronici e attacchi informatici.
- **Questioni etiche e legali** legate all'uso di sistemi d'arma autonomi e alla possibilità di errori letali.

5.2 Impatti economici e occupazionali

La robotica militare, come l'automazione industriale, ha effetti contrastanti sul lavoro:

- alcuni ruoli tradizionali (autisti, magazzinieri, operatori di sorveglianza) potrebbero ridursi;
- si creano nuove professioni ad alta qualificazione (ingegneri di robotica, analisti di dati, esperti di cyber-sicurezza);
- l'investimento in ricerca e sviluppo può generare ricadute positive anche nel settore civile, favorendo l'innovazione tecnologica di un Paese.

Tuttavia, i costi iniziali dei sistemi robotici sono molto elevati e possono influire in modo significativo sui bilanci pubblici.

5.3 Svantaggi tecnici e rischi operativi

5.3.1 Affidabilità e complessità

I sistemi robotici militari sono tecnologicamente complessi. Possibili problemi includono:

- guasti hardware dovuti a vibrazioni, urti o condizioni ambientali estreme;
- errori software o bug non individuati durante i test;
- malfunzionamenti dei sensori che portano a decisioni errate.

In contesti di combattimento, un singolo errore può avere conseguenze gravi sia per il proprio schieramento sia per i civili.

5.3.2 Vulnerabilità a disturbi ed attacchi

- I collegamenti radio e satellitari possono essere **disturbati** intenzionalmente (*jamming*) o ingannati (*spoofing*).
- I software di bordo possono essere presi di mira da **attacchi informatici**, mirati a prendere il controllo del robot o a impedirne il funzionamento.
- I sensori possono essere **accecati** da laser o sovraccaricati da falsi segnali.

5.4 Questioni etiche, legali e politiche

5.4.1 Distanza psicologica dalla violenza

Il controllo remoto dei sistemi d'arma può creare una certa distanza psicologica tra l'operatore e le conseguenze delle sue azioni. Alcuni studiosi temono che questo possa:

- rendere più facile l'uso della forza;
- ridurre la percezione del rischio e della responsabilità;
- contribuire alla **banalizzazione della guerra**.

5.4.2 Responsabilità e diritto internazionale umanitario

Il diritto internazionale umanitario (DIU) si basa su principi come:

- **distinzione** tra civili e combattenti;
- **proporzionalità** nell'uso della forza;
- **precauzione** per limitare i danni collaterali.

L'introduzione di sistemi autonomi pone domande nuove:

- chi è responsabile se un algoritmo sbaglia bersaglio?
- come verificare, dopo un'operazione, che le decisioni prese da un sistema autonomo siano state conformi alle leggi di guerra?
- è possibile tradurre concetti giuridici complessi in regole programmabili senza ambiguità?

5.4.3 Corsa agli armamenti e proliferazione

Se un numero crescente di Paesi sviluppa armi robotiche avanzate, esiste il rischio di una nuova **corsa agli armamenti**. Inoltre:

- sistemi relativamente economici, come i piccoli droni armati, possono essere acquistati o modificati anche da attori non statali;
- la difficile tracciabilità di alcune tecnologie favorisce la **proliferazione** incontrollata.

5.5 Sintesi critica

💡 Bilancio complessivo

- La robotica militare può **ridurre i rischi** per i soldati e migliorare la **precisione** degli interventi.
- Allo stesso tempo può **facilitare l'uso della forza**, aumentare la **complessità dei conflitti** e creare **nuove disuguaglianze** tra Paesi dotati o meno di tali tecnologie.
- Il punto decisivo è garantire un **controllo umano significativo** sui sistemi d'arma e sviluppare **regole internazionali condivise**.

6 Conclusioni

La robotica militare rappresenta uno dei fronti più avanzati e controversi dell'automazione contemporanea.

Dall'analisi svolta emergono alcuni elementi fondamentali:

- i robot offrono nuove possibilità operative, in particolare nella **protezione del personale** e nella **raccolta di informazioni**;
- la convergenza tra **Industria 4.0** e **Difesa** sta trasformando sia il modo di produrre armamenti sia il modo di condurre le operazioni;
- la crescente **autonomia** dei sistemi solleva interrogativi profondi su responsabilità, etica e controllo politico dell'uso della forza;
- le scelte che governi e società civile compiranno nei prossimi anni determineranno se la robotica sarà usata principalmente per **aumentare la sicurezza** e prevenire vittime, oppure se contribuirà a nuovi rischi e instabilità.

Per gli studenti che si avvicinano a questo tema è importante sviluppare non solo competenze tecniche, ma anche una forte **consapevolezza etica**. Studiare la robotica militare significa interro-garsi sul rapporto tra esseri umani, tecnologia e responsabilità nelle decisioni più delicate: quelle che riguardano la vita e la morte.

A Glossario di termini principali

Robot

Macchina programmabile in grado di percepire l'ambiente, elaborare informazioni ed eseguire azioni fisiche autonome o semi-autonome.

UGV

Unmanned Ground Vehicle, veicolo terrestre senza equipaggio.

UAV *Unmanned Aerial Vehicle*, drone aereo.

USV

Unmanned Surface Vehicle, veicolo di superficie senza equipaggio.

UUV

Unmanned Underwater Vehicle, veicolo subacqueo senza equipaggio.

Industria 4.0

Insieme di tecnologie (IoT, big data, IA, robotica avanzata, stampa 3D) che digitalizzano e automatizzano i processi produttivi.

Difesa 4.0

Applicazione dei principi dell'Industria 4.0 al settore militare e alla logistica della difesa.

LAWS

Lethal Autonomous Weapon Systems, sistemi d'arma autonomi letali.

Swarm robotics

Robotica degli sciami, che studia la cooperazione di molti robot relativamente semplici.

Manutenzione predittiva

Manutenzione basata sull'analisi dei dati dei sensori per prevedere e prevenire i guasti prima che si verifichino.

GPS

Global Positioning System, sistema di posizionamento satellitare utilizzato per determinare la posizione di un veicolo o di un robot.

IMU *Inertial Measurement Unit*, unità che misura accelerazioni e rotazioni per stimare spostamenti e assetto del veicolo.

Bibliografia essenziale

- Comitato Internazionale della Croce Rossa, *Autonomous weapon systems: Implications of increasing autonomy in the critical functions of weapons*, vari rapporti.
- Nazioni Unite, *Group of Governmental Experts on Lethal Autonomous Weapons Systems*, documenti di lavoro e raccomandazioni.
- International Federation of Robotics, *World Robotics Reports*, varie edizioni.
- SIPRI (Stockholm International Peace Research Institute), *Yearbook*, capitoli su spesa militare e tecnologie emergenti.
- P. W. Singer, *Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century*, Penguin Books.
- M. L. Cummings, articoli sulla supervisione umana dei sistemi autonomi in ambito militare.