PANORAMICA SULL'UTILIZZO DI ROVER TERRESTRI E DRONI AEREI IN AGRICOLTURA

5ª edizione di EIMA Campus,
Bologna 7 Novembre 2024

Prof. Ing. Simone Pascuzzi
Dott. Ing. Francesco Paciolla

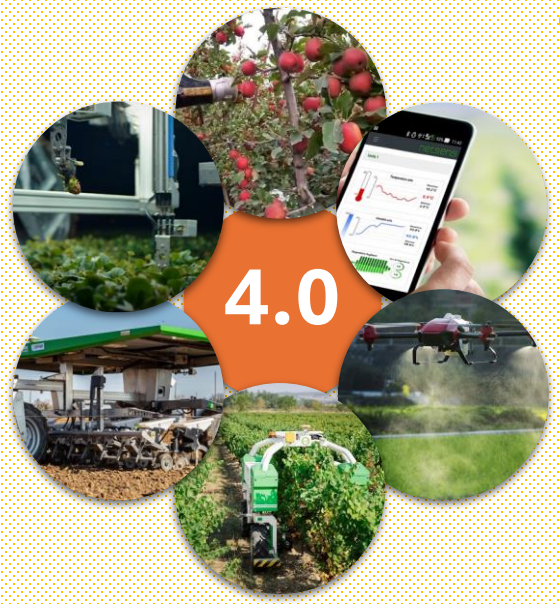
Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti (Di.S.S.P.A.) - Università degli Studi di Bari

Agricoltura di Precisione

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

L'agricoltura di precisione è una ***strategia di gestione dell'attività agricola*** *con la quale i dati vengono raccolti, elaborati, analizzati e combinati con altre informazioni per* ***orientare le decisioni in funzione della variabilità spaziale e temporale*** *al fine di migliorare:*



- ***L'efficienza nell'uso delle risorse*** *(*acqua, fertilizzanti, prodotti fitosanitari*);*
- ***La produttività***, ***la qualità*** *e la* ***redditività****;*
- ***La sostenibilità della produzione agricola***.

Stretto legame tra Agricoltura di Precisione e sostenibilità, mirata a ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura.

L'Agricoltura di precisione si inserisce nel quadro dell'**Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile**, un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità.

17 Obiettivi e **169 Target**

Piattaforme Robotiche per il Monitoraggio e la Gestione in Agricoltura

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

*La **robotica agricola** è un campo di ricerca emergente focalizzato sullo sviluppo di **piattaforme robotiche a controllo remoto** utilizzate per **supportare gli agricoltori** e **automatizzare alcune attività agricole**.*

Queste piattaforme **stanno rivoluzionando** il settore agricolo, integrando diverse tecnologie, quali **sensoristica avanzata**, **machine learning**, **data fusion** e **intelligenza artificiale**.

I sistemi a cui si fa riferimento sono:

- ***Aeromobili a pilotaggio remoto*** *(Droni) o* ***UAV*** *(Unmanned Aerial Vehicle)*
- ***Veicoli terrestri senza pilota*** *(Rover terrestri) o* ***UGV*** *(Unmanned Ground Vehicle)*

Vantaggi dell'automazione dei processi

- **Incrementare** la produttività e la qualità;
- **Diminuire** i costi a lungo termine;
- **Mitigare** gli effetti della carenza di manodopera;
- **Migliorare** la sicurezza dei lavoratori;
- **Automatizzare** operazioni agicole che richiedono tempo e sforzo;

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

1. DRONI AEREI

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

I regolamenti comunitari (UE) ***2019/945*** *e (UE)* ***2019/947*** *definiscono un* ***UAS (Unmanned Aircraft System)*** *come il sistema costituito da:*

aeromobile a pilotaggio remoto senza persone a bordo (UAV) + ***componenti necessari per il controllo e comando*** *(stazione di controllo)* ***da parte di un pilota remoto***

In base alla modalità di volo adottata possiamo distinguere:

Droni ad ala battente (o ala fissa)

- Hanno una configurazione simile a quella di un aeroplano;
- Richiedono una pista di decollo ed atterraggio;

Droni ad elica ad asse verticale (multirotori)

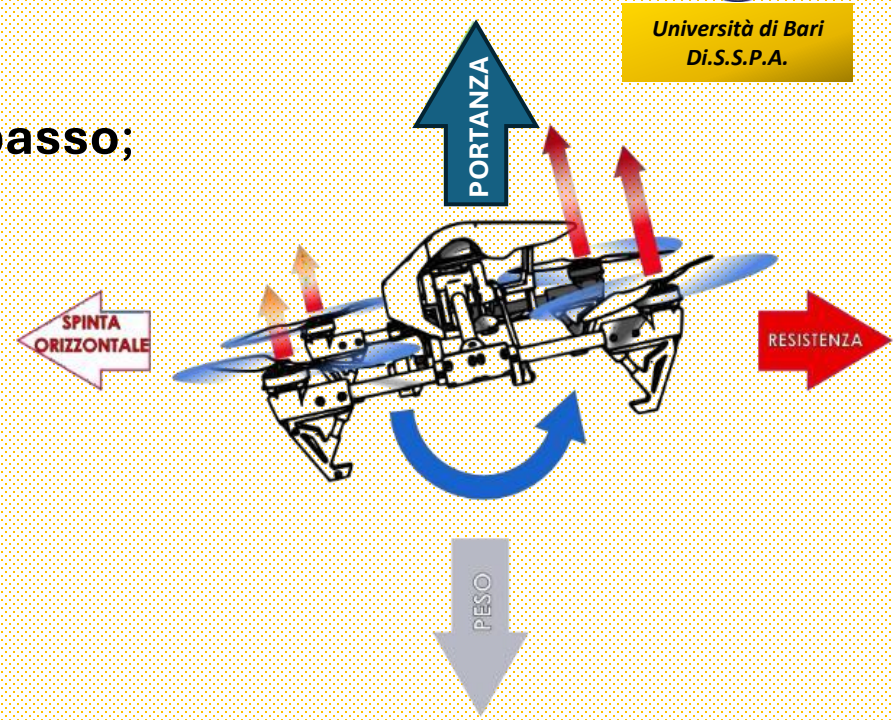
- Utilizzano eliche rotanti per il volo;
- Effettuano il **decollo** e **l'atterraggio verticale**;

Principi di Volo

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Un drone è soggetto sostanzialmente a **quattro forze**:

- **Forza peso**: generata dal peso del drone, **è sempre diretta verso il basso**;
- **Portanza**: E' la componente della forza aerodinamica risultante **ortogonale alla direzione del moto**;
- **Resistenza**: E' la forza che **si oppone al moto**. Rappresenta la componente della forza aerodinamica risultate **parallela alla direzione del moto** ma che agisce in **verso opposto**;
- **Spinta**: E' la forza motrice generata dal sistema propulsore, **imprime il moto nella direzione desiderata**.

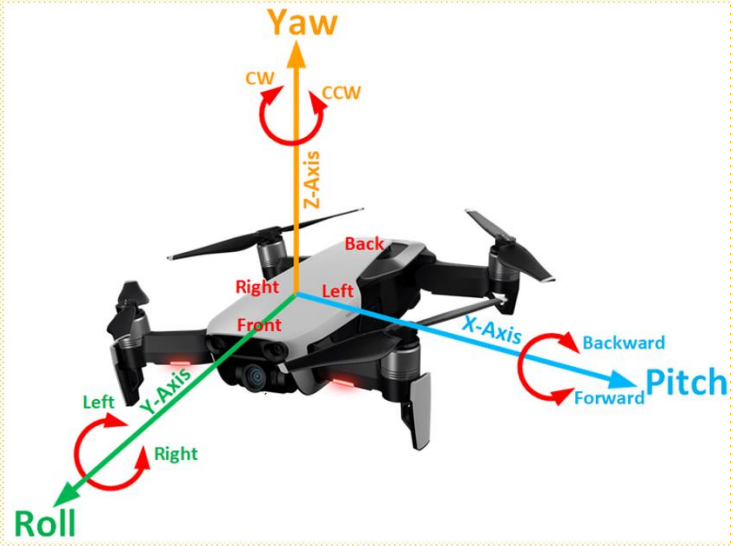


Assi di Rotazione

Gli **assi intorno ai quali ruota un drone** sono tre linee immaginarie che passano per il suo baricentro:

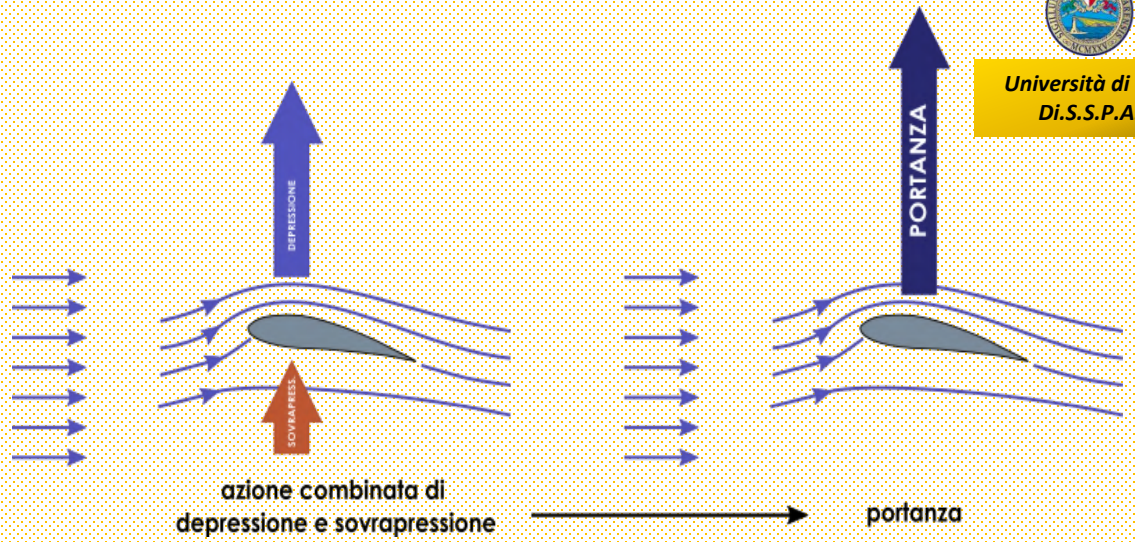
- **l'asse longitudinale** – asse di rollio (roll);
- **l'asse trasversale** – asse di beccheggio (pitch);
- **l'asse verticale** – asse di imbardata (yaw).

Un drone per cambiare il proprio assetto di volo, deve necessariamente compiere una o più rotazioni intorno a questi assi!



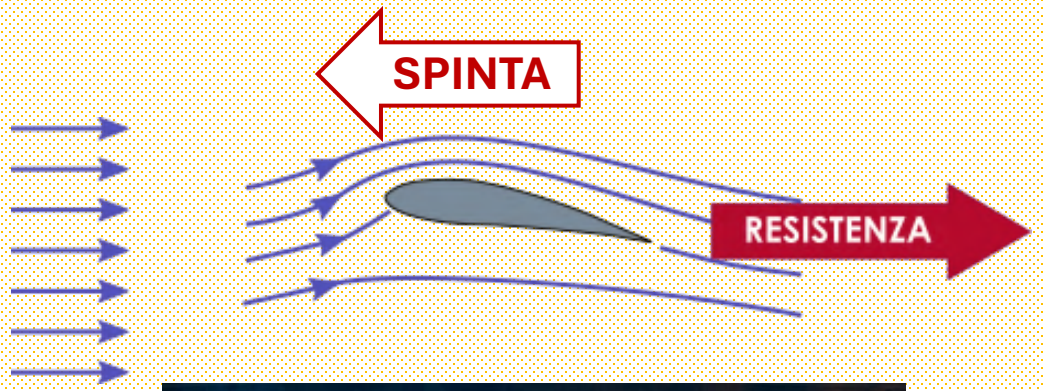
Portanza

- La portanza è determinata principalmente dalle eliche. E' generata dalla **differenza di pressione tra la superficie superiore e inferiore** di un corpo immerso in un a corrente d'aria;
- Nei multicotteri, ogni elica genera una portanza **diretta perpendicolarmente ai piani di rotazione delle pale**.

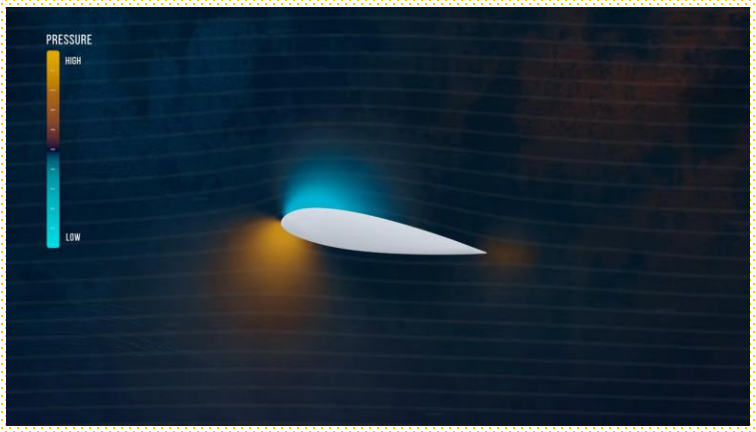


Resistenza

- Quando un corpo è immerso in una corrente d'aria, si genera anche una **forza che si oppone al moto** denominata resistenza;
- La resistenza di un profilo alare è composta da: **resistenza di attrito** tra aria e pareti esterne, **resistenza di forma** e **resistenza indotta**, causata dalla distribuzione di pressione.



In condizioni di **volo stabilizzato**:
Portanza = Forza Peso
Se **Spinta > Resistenza**,
il drone avanza



Applicazioni dei Droni in Agricoltura

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

L'utilizzo dei droni in agricoltura consente di raccogliere informazioni ***dal ricco contenuto informativo*** *per* ***programmare interventi mirati****.*

Caratteristiche principali

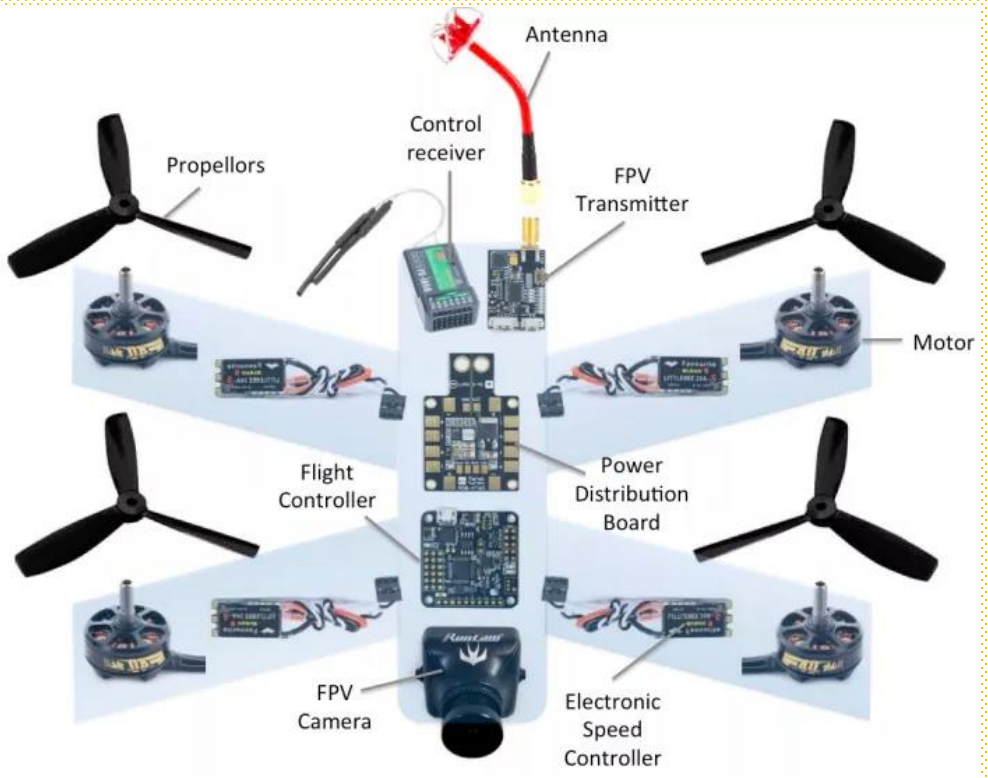
- **Controllo flessibile**, con tempi di pianificazione delle missioni ridotti e **versatilità**;
- **Monitoraggio in tempo reale**, facilitando interventi tempestivi;
- Catturare immagini con **camere RGB** (Red-Green-Blue), **multispettrali** e **termiche** con **alta risoluzione spaziale**.

Sottosistemi di un Drone

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Ogni drone è costituito da **cinque sottosistemi** di base:

- **Sostentamento:** Permette al drone di rimanere in volo, è costituito dal telaio e delle eliche;
- **Propulsione:** E' ottenuta mediante motori elettrici, alimentati dalle batterie, che trasferiscono energia alle eliche in modo da provocarne il movimento;
- **Sensoristica:** Include i sensori con cui è equipaggiato il drone;
- **Controllo:** Governa gli altri sottosistemi, permettendo il pilotaggio del drone;
- **Carico Utile:** Rappresenta il carico utile trasportabile dal drone.



Sostentamento

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

TELAIO E' il **corpo principale del drone** che supporta tutti gli altri componenti. Il telaio può variare per dimensione e complessità ma solitamente è **realizzato in fibra di carbonio** o alluminio.

ELICHE Sono costituite da due pale spesso realizzate in fibra di carbonio. Per una migliore stabilità aerodinamica la maggioranza dei droni **è dotato di un numero pari di eliche**.

Il modello di drone più diffuso è il **quadricottero (4 eliche)**, offre il design meccanico più semplice.

Le eliche possono ruotare in entrambi i sensi di rotazione e **la velocità di ciascuna è controllata indipendentemente dalle altre**, permettendo ai multirotori di muoversi in tutte le direzioni (omnidirezionali).

Propulsione

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

BATTERIE

L'ampia diffusione dei droni è legato allo sviluppo tecnologico delle **batterie ai polimeri di litio** (Li-Po). Queste batterie offrono un **ottimo rapporto capacità/peso**.

I **valori** più importanti da considerare sono:

i) La **capacità della cella** in mAh **ed il voltaggio**;

ii) Il **numero di celle** collegate in serie;

iii) **Valore della corrente** e velocità di scarica;

La durata della batteria dipende:

Dalla grandezza del drone

Dal Carico Utile

In ogni drone è presente un modulo che raccoglie informazioni sulla **durata residua della batteria** e permette di **tornare automaticamente alla base** quando la batteria è scarica.

Propulsione

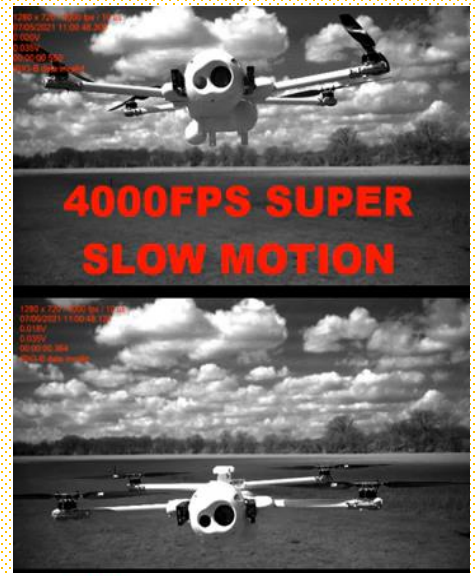
Università di Bari
Di.S.S.P.A.

MOTORI

I motori elettrici utilizzati nei droni devono:

i) Garantire una coppia elevata ed essere affidabili;

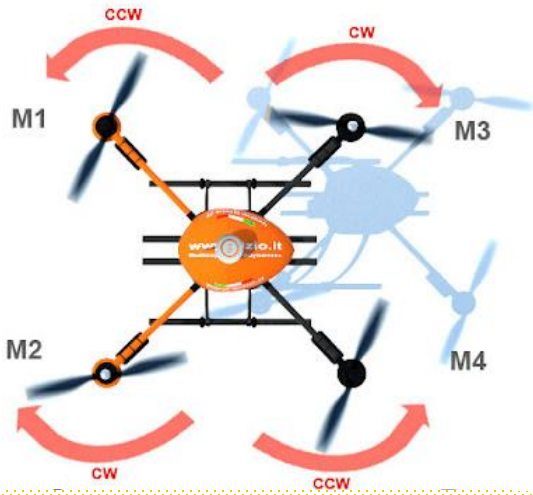
ii) Rispondere velocemente ai cambi del regime di rotazione.



I droni **non utilizzano un sistema di trasmissione**, bensì un sistema direct-drive. **Ciascuna elica è collegata direttamente al motore elettrico brushless a magneti permanenti che la muove**.

La coppia motrice applicata
all'albero motore

una coppia di segno opposto che tende a far ruotare
il drone nella direzione opposta



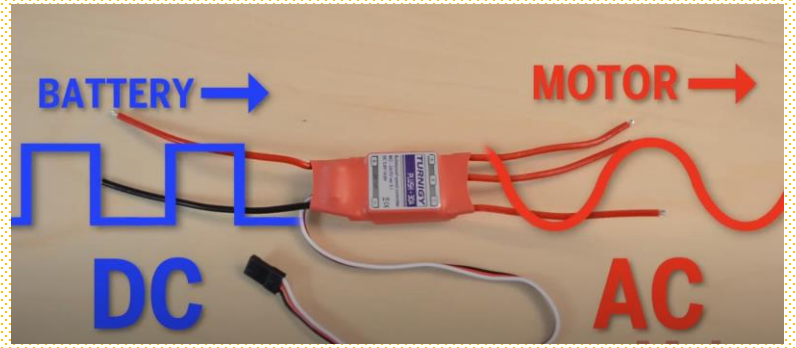
Ogni motore elettrico è installato in modo che quelli adiacenti abbiano verso di rotazione opposto, in modo da controbilanciare questo effetto.

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

REGOLATORE DI VOLO ED ELECTRONIC SPEED CONTROLLER

Regolatore di Volo: **E' una scheda con microprocessore programmabile** a cui arrivano i segnali provenienti dai diversi sensori e coordina gli Electronic Speed Controllers dei motori. E' fondamentale per la stabilizzazione del volo ed il controllo del drone, la gestione delle diverse modalità di volo e la memorizzazione di voli programmati.

L'ESC: (Electronic Speed Controller) **è un controller** che viene posizionato su ogni motore. L'ESC interfaccia il Regolatore di Volo con ciascun motore. Esso controlla il numero i giri, varia la velocità di rotazione durante i cambi di velocità e stabilizza il drone.



RADIOCOMANDO

Il radiocomando **trasmette i comandi** di governo al drone, attraverso un'antenna di trasmissione, ad un'antenna collegata ad un ricevitore, installati a bordo del drone.

La maggior parte dei droni sono controllati da un telecomando standard con **almeno 4 canali**:

- **Due leve principali che occupano 4 canali**, uno per ciascuno degli assi sui quali la leva può muoversi (avanti/indietro, destra/sinistra);
- **Un canale** accessorio per **controllare la modalità di volo** impostata.

Esistono 4 diverse modalità di controllo che si differenziano per la diversa configurazione delle due leve di commando, la **modalità 2 è solitamente impostata come predefinita**.

RADIOCOMANDO

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

ROLLIO: il movimento ***sinistra-destra*** della ***leva destra*** controlla il rollio. Questo inclina il drone a sinistra o a destra rispetto alla sua parte anteriore;

BECCHEGGIO: il movimento ***avanti-indietro*** della ***leva destra*** controlla il beccheggio. Questo inclina il muso del drone verso l'alto o il basso;

IMBARDATA: il movimento ***sinistra-destra*** della ***leva sinistra*** controlla l'imbardata. È possibile, per esempio, eseguire un'imbardata in senso orario aumentando la velocità delle due eliche che ruotano in senso orario e diminuendo la velocità delle eliche che ruotano in senso antiorario;

SALITA/DISCESA: il movimento ***avanti-indietro*** della ***leva sinistra*** controlla la salita o la discesa del drone. Affinché il velivolo possa decollare dal suolo, l'accelerazione prodotta dai motori deve generare sufficiente portanza da riuscire a contrastare la forza peso.

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

UNITÀ DI MISURA INERZIALE (IMU)

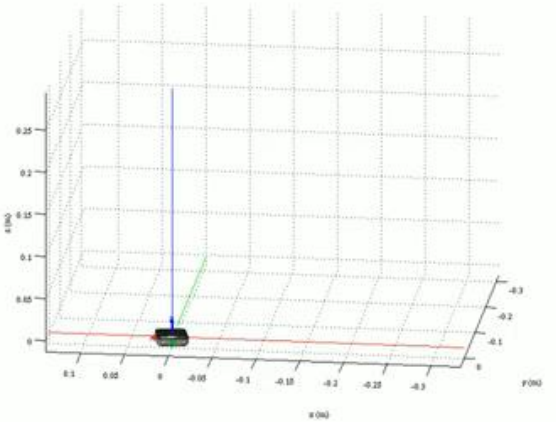
E’ un dispositivo elettronico che permette al Regolatore di Volo di rilevare eventuali spostamenti fisico-meccanici del drone. Esso include diversi sensori:

- **Magnetometro:** E’ una bussola digitale, fornisce informazioni sull’orientamento del drone;
- **Giroscopio:** Misura gli angoli di assetto del drone e controlla la stabilità del drone;
- **Accelerometro:** Misura le accelerazioni del drone lungo i tre assi;
- **Barometro:** Calcola l’altitudine, misurando la pressione atmosferica.

Questi sensori forniscono i dati al Regolatore di Volo per **mantenere il drone stabile durante il volo**.

Alcuni droni possono essere equipaggiati con sensori che forniscono funzionalità avanzate:

- Sensori di velocità dell’aria;
- Sensori anticollisione;
- Sensori per la visione artificiale.



Sensoristica

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Global Positioning System (GPS)

E' un **sistema di navigazione satellitare** che permette la **localizzazione del drone**. L'antenna GPS è montata al di sopra di tutti gli altri componenti per evitare eventuali interferenze magnetiche.

I droni possono avere diverse **modalità di volo**:

1. **VOLO STABILIZZATO:** Mantiene il drone in una determinata posizione (latitudine, longitudine e altitudine). Il drone corregge automaticamente la sua posizione quando questa viene variata da qualche fattore esterno (es. vento);
2. **MODALITA' MANUALE:** Il pilota controlla il drone tramite il radiocomando. Il GPS comanda direttamente il Regolatore di Volo;
3. **NAVIGAZIONE AUTOMATICA:** E' la navigazione in cui il pilota sceglie un'area su cui effettuare il volo ed il drone automaticamente calcola i parametri ottimali per effettuarlo;
4. **NAVIGAZIONE BASATA SUI WAYPOINTS**: E' la navigazione autonoma per mezzo di waypoints salvati. Questa modalità è particolarmente utile quando il drone viene utilizzato per creare mappe, assicurando l'esecuzione sempre dello stesso percorso;
5. **RETURN TO HOME:** Questa modalità permette al drone di determinare una posizione da considerare come casa, di solito il punto dove è avvenuto il decollo, e di ritornarvi in determinate circostanze (es. in caso di guasto o scarica delle batterie).

Carico Utile

Nelle operazioni di monitoraggio è tipicamente costituito dall'assieme di **una/più camere ed un gimbal (giunto cardanico)** che stabilizza le camere sui 3 assi durante il volo .

Una **scheda di acquisizione** presente sul drone permette il salvataggio delle immagini acquisite dal drone. Successivamente una stazione di terra (smartphone, tablet o PC) gestisce ed analizza i dati acquisiti utilizzando appositi software.

Monitoraggio con Camera RGB

Un **ortomosaico** è una **mappa aerea 3D** ottenuta dall'insieme di **immagini RGB**. La mappa viene utilizzata per:

- **Monitoraggio e Mappatura dei confini:** Fornire una **visione dall'alto**, ma al tempo stesso **dettagliata**, dell'intero campo e definirne i confini;
- **Pianificazione e Gestione dei Campi:** **Pianificare le rotazioni delle colture**, la **gestione dell'irrigazione** e la **distribuzione dei fertilizzanti**;
- **Valutazione dei Danni:** Dopo eventi meteorologici estremi, queste mappe aiutano a **valutare l'entità dei danni** alle colture.

Monitoraggio con Camera Multispettrale

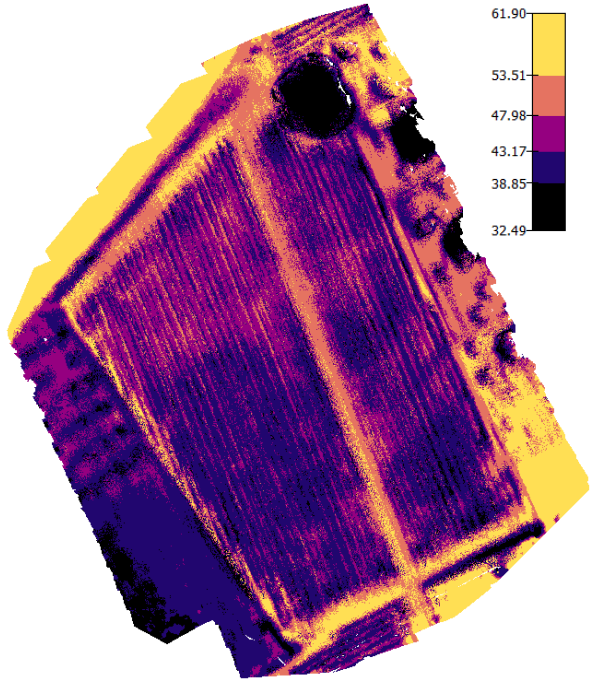
Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Queste camere vengono utilizzate **monitorare lo stato di salute della vegetazione e del suolo** attraverso **indici vegetazionali** e **pianificare interventi mirati.** Possono essere definiti molteplici indici utilizzando diverse bande spettrali.

Monitoraggio con Camera Termica

Il rilievo mediante **camera termica** genera mappe utili per:

- **Gestione delle Irrigazioni:** definiscono zone con maggiore o minore necessità di irrigazione, permettendo **un uso più efficiente dell'acqua**;
- **Monitoraggio della Salute delle Colture**: La temperatura delle foglie e del suolo può essere un **indicatore della salute delle piante**. Le mappe termiche aiutano a individuare aree colpite da **stress termico**, **infestazioni di parassiti** o **malattie**;
- **Gestione del Microclima:** Le mappe termiche possono essere utilizzate per **studiare il microclima** all'interno di un campo agricolo, permettendo di prendere decisioni su pratiche di gestione agricola.

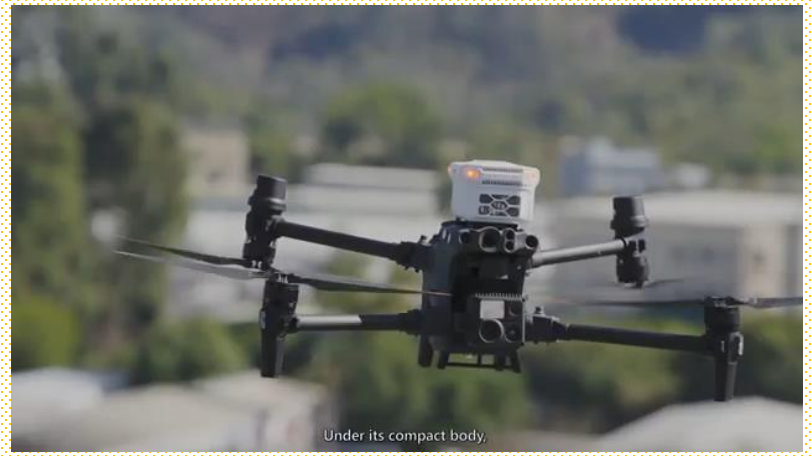


Applicazioni

Sul mercato si trovano droni per **l'applicazione spray** e per la distribuzione di formulati **granulari e polverulenti.**

Droni per **l'impollinazione artificiale** sono tutt'oggi oggetto di ricerca.

- L'art. 9 della **Direttiva 2009/128/CE** sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari e il **Piano di azione nazionale** per l'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari (PAN), **vietano l'irrorazione di prodotti fitosanitari con mezzi aerei, salvo deroghe.**
- Recentemente in diverse zone d'Italia stanno avendo luogo alcune **sperimentazioni sul campo**. ***Si spera in un futuro via libera!***



I droni possono essere equipaggiati anche con sensori per **monitorare la qualità dell'aria**.

2. ROVER TERRESTRI

Definizione di Veicolo Terrestre Senza Pilota

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

*Un veicolo terrestre senza pilota è un **sistema autonomo o controllato da remoto** in grado di **percepire l'ambiente in cui si trova** ed **agire su di esso** per raggiungere i propri obiettivi.*

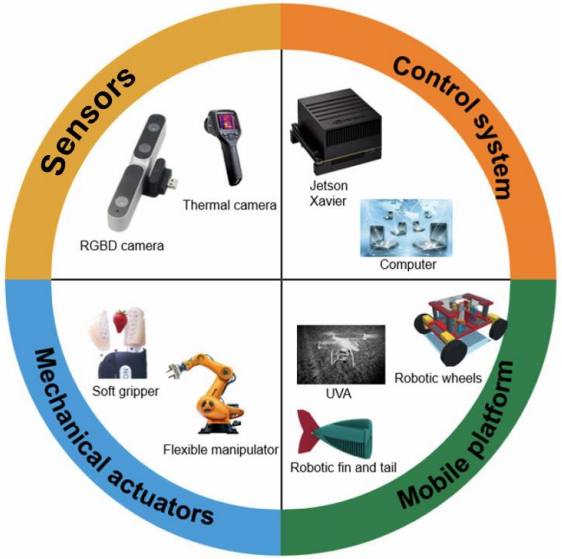
Autonomo infatti è in grado di prendere autonomamente decisioni.

Percepisce l'ambiente attraverso i sensori di bordo.

Sfrutta le informazioni percepite per **intraprendere azioni** e raggiungere l'obiettivo prefissato.

Un rover terrestre è costituito da **quattro blocchi** fondamentali:

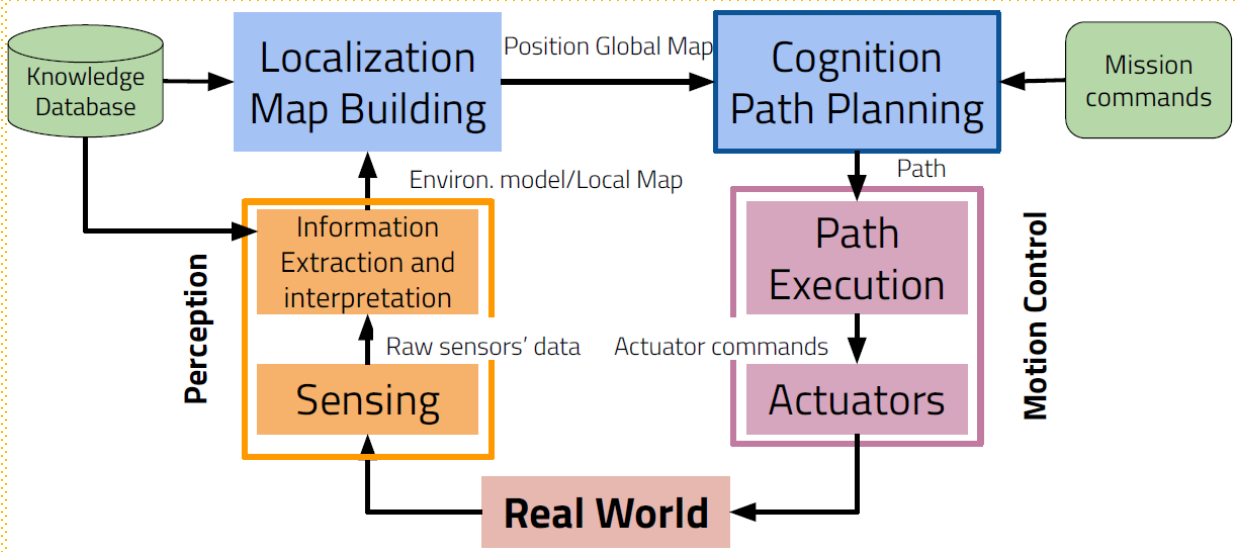
- ❑ Una **piattaforma mobile** per la locomozione nell'ambiente in cui opera;
- ❑ **Sensori di bordo** per la percezione dell'ambiente e la localizzazione del rover;
- ❑ Un **sistema di controllo** per elaborare i dati acquisiti e prendere autonomamente decisioni;
- ❑ **Attuatori** per intraprendere azioni.



Ciclo delle Operazioni

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

- **Percezione dell'ambiente:** il rover, mediante i sensori di bordo, è in grado di ottenere informazioni sull'ambiente in cui opera;
- **Elaborazione dei dati:** il rover elabora ed analizza i dati ottenuti dai sensori per generare una rappresentazione dell'ambiente in cui si trova e localizzarsi;
- **Pianificazione del percorso e Navigazione:** il rover genera un piano operativo basato sulla rappresentazione dell'ambiente generata, sul suo stato e sugli obiettivi del compito da effettuare;
- **Controllo del moto:** Il rover è in grado di prendere decisioni e di comandare gli attuatori.



Applicazioni dei Rover Terrestri in Agricoltura

*Un **rover agricolo** è un dispositivo in grado di **supportare gli agricoltori** svolgendo **in maniera autonoma** alcune operazioni agricole, **migliorando l'efficienza dei processi agricoli**.*

Caratteristiche principali

- **Versatilltà**, ovvero poter essere adattato per svolgere diverse operazioni agricole a seconda delle esigenze;
- **Buona autonomia,** per operare per molte ore senza dover essere ricaricato;
- **Motori elettrici o ibridi** che sviluppano coppie elevate;

Locomozione

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

E' il meccanismo che permette al rover di **muoversi nell'ambiente**. Una delle configurazioni più utilizzate in ambito agricolo è l'utilizzo di **cingoli**.

VANTAGGI UTILIZZO CINGOLI RISPETTO ALLE RUOTE

- **Migliore distribuzione del peso** del rover, avendo una maggiore superficie di aderenza al suolo;
- **Maggiore trazione** e riduzione dell'affondamento, in particolare su terreni morbidi, sabbiosi e fangosi;
- **Migliore manovrabilità** su terreni sconnessi;
- **Migliore stabilità**, riducendo il rischio di ribaltamento;
- **Migliore durezza e robustezza**.

LIMITAZIONE
- Durante le svolte e le rotazioni si ha slittamento.

Azionamento differenziale E' un sistema di trazione molto utilizzato nei rover agricoli. La velocità e la direzione del movimento vengono controllate **variando la velocità dei cingoli**.

- Se i cingoli hanno la **stessa velocità** il rover si muove in **linea retta**;
- Se **un cingolo ruota più velocemente dell'altro**, **il rover curva**;
- Se i cingoli ruotano in **direzioni opposte ma con stessa velocità**, il rover **ruota sul posto**.

Percezione dell'ambiente

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

La capacità di percezione è affidata ai **sensori**, questi dispositivi consentono a un rover di ottenere **informazioni sullo stato interno del sistema meccanico** e **sull'ambiente circostante.**

Sensori propriocettivi

- *Encoder*
- *Giroscopi*
- *Trasduttori di posizione*
- *Sensori per lo stato della batteria*

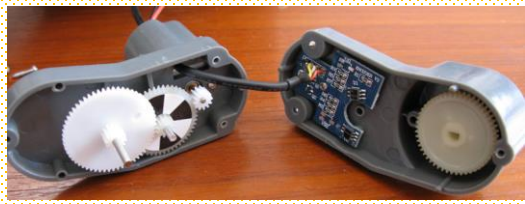
Sensori esterocettivi

- *Camere*
- *LiDAR*
- *Radar e sensori ad ultrasuoni*

Sensori propriocettivi

- **Encoder**

E' un dispositivo elettromeccanico che trasforma la posizione angolare o lineare di un componente in un segnale elettrico. Nel caso di un rover, permette di **misurare la posizione e la velocità dei cingoli** o delle ruote.



VANTAGGI

- Resistere a condizioni ambientali difficili (polvere, fango, umidità);
- Forniscono feedback in tempo reale;
- Facilità di Integrazione.

LIMITAZIONI

- Possono richiedere circuiti aggiuntivi per la lettura e l'elaborazione dei segnali;
- Usura meccanica che può ridurre la loro precisione;
- Sensibilità alle interferenze elettromagnetiche.

Sensori propriocettivi

- **Unità di Misura Inerziale (IMU)**

E’ un dispositivo che integra un accelerometro triassiale (misurazione delle accelerazioni lineari), un giroscopio (misurazione della velocità angolare) e un magnetometro.

VANTAGGI

- Piccole dimensioni e basso peso, ideali per integrazione su piattaforme robotiche.

LIMITAZIONI

- Necessità di calibrazione per stimare la posizione dell’IMU relativa al centro di rotazione del rover, diversamente le letture effettuate sarebbero inconsistenti;
- I campi elettromagnetici potrebbero introdurre imprecisioni.

- **Sensori di inclinazione**

Misurano l'angolo di inclinazione del rover rispetto al piano orizzontale, sono cruciali per il controllo della stabilità e della navigazione in terreni irregolari come quelli agricoli.

VANTAGGI

- Piccole dimensioni e basso peso, ideali per integrazione su piattaforme robotiche.

LIMITAZIONI

- Sono influenzati dalle vibrazioni generate durante il movimento del rover;
- Necessità di calibrazione frequente per assicurare la precisione delle misure.

Sensori esterocettivi

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

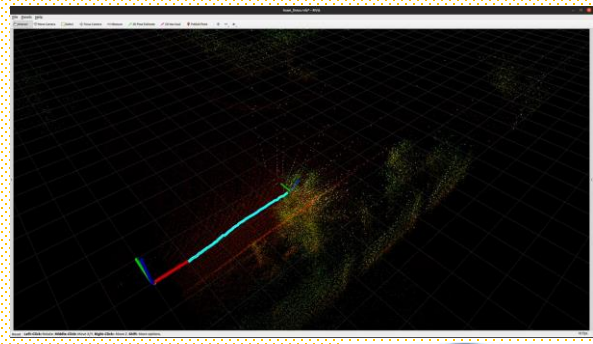
- **Sensori LiDAR:** Rilevano la posizione e la velocità di un oggetto bersaglio emettendo un raggio laser e misurando il tempo di ritorno della radiazione riflessa.

VANTAGGI

- Elevata precisione e lungo raggio di rilevamento;
- Non sono influenzati dalle condizioni di illuminazione dell'ambiente, possono essere utilizzati anche in notturna.

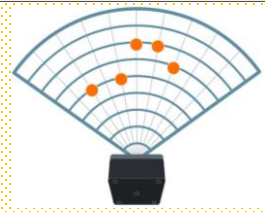
LIMITAZIONI

- Le prestazioni peggiorano in caso di condizioni avverse (pioggia, neve, nebbia);
- Gli oggetti scuri e speculari non possono essere rilevati correttamente.

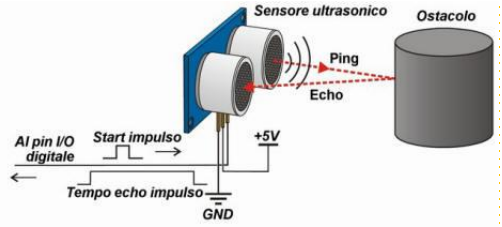


Questi sensori possono essere **2D o 3D** e permettono di ottenere **informazioni geometriche** e **ricostruire la mappa dell'ambiente** circostante sotto forma di **nuvola di punti**.

- **Sensori radar:** Rilevano la posizione e la velocità di un oggetto bersaglio emettendo **onde radio**. Sebbene i radar **non siano influenzati dalle condizioni meteorologiche**, essi hanno una **risoluzione e precisione inferiore rispetto al LiDAR**.



- **Sensori a ultrasuoni:** Rilevano un oggetto bersaglio emettendo **onde sonore**. Questi sensori hanno **costi e dimensioni ridotte** ma presentano **bassa precisione** e **campo visivo ristretto**, che può causare punti ciechi durante il rilevamento.

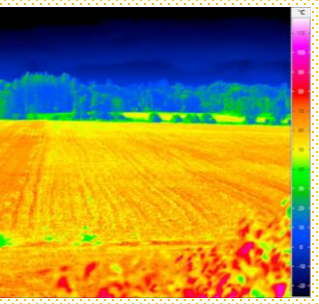


Sensori esterocettivi

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

- **Camere**

Termiche: La radiazione infrarossa emessa da un oggetto dipende dalla sua temperatura. Diverse temperature sono rappresentate con diverse tonalità di colore.



VANTAGGI

- Funzionamento anche in condizioni di scarsa illuminazione.

LIMITAZIONI

- Cost elevato;
- Risoluzione non eccellente;
- Influenza delle condizioni ambientali (umidità, polvere);

A 360°: Catturano immagini in tutte le direzioni, creando un campo visivo completo. Utilizzano più obiettivi per catturare simultaneamente immagini in diverse direzioni, che vengono poi unite in post-processing per creare un'immagine panoramica.

VANTAGGI

- Permettono di ricostruire immagini a 360° dell'ambiente circostante.

LIMITAZIONI

- Costo elevato;
- La risoluzione potrebbe peggiorare a causa della necessità di unire diverse immagini.

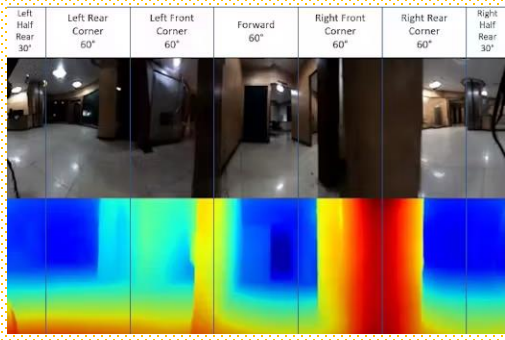
Stereoscopiche: Funzionano in modo simile alla percezione visiva umana, simulando la percezione di profondità utilizzando due o più obiettivi che catturano immagini da angolazioni leggermente diverse. Queste immagini vengono poi utilizzate per creare una rappresentazione 3D.

VANTAGGI

- Forniscono informazioni 3D precise della distanza e della forma degli oggetti.

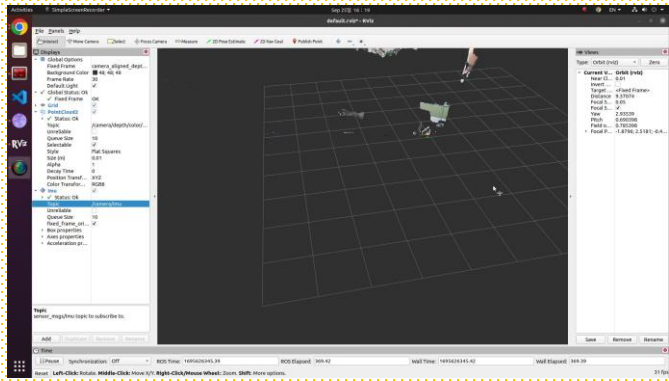
LIMITAZIONI

- Costo elevato;
- Elaborato post-processing.



di Profondità (depth camera): Acquisiscono direttamente informazioni sulla distanza degli oggetti rispetto alla camera stessa. Possono essere utilizzate per creare mappe 3D dettagliate dell'ambiente circostante.

La tipologia più utilizzata di queste camere è la Camera a Tempo di Volo (*Time-of-Flight*), questa misura il tempo impiegato da un impulso luminoso emesso dal sensore a tornare al sensore stesso dopo essere stato riflesso dall'oggetto bersaglio.



VANTAGGI

- Forniscono informazioni 3D con elevata precisione.

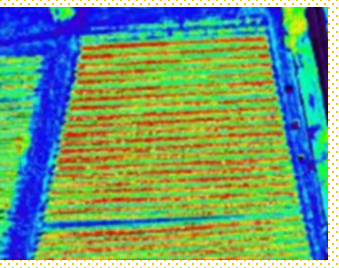
LIMITAZIONI

- Costo elevato;
- Performance influenzata da condizioni di illuminazione scarse;
- Raggio d'azione limitato.

Camere spettrali: acquisiscono informazioni misurando **la radianza riflessa, emessa e trasmessa dall'oggetto bersaglio** nello **spettro visibile** e nello **spettro del vicino infrarosso** (NIR).

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Possono essere classificati in **multispettrali** (meno di 20 bande) o **iperspettrali** (centinaia di bande)



VANTAGGI

- Possibilità di calcolo di indici vegetazionali valutando la risposta spettrale della vegetazione.

LIMITAZIONI

- La velocità di archiviazione dei sistemi di acquisizione deve essere sufficiente a prevenire la perdita di dati;
- A causa della grande quantità di dati raccolti, sono spesso necessarie tecniche di post-elaborazione e di riduzione delle dimensioni.

Data fusion

Combinando i dati acquisiti da più sensori è possibile ottenere:

- **Una risoluzione spaziale migliore** rispetto a quella ottenibile dai singoli sensori;
- **Una riduzione dell'effetto del rumore** nelle misure dei sensori e **colmare le lacune nell'acquisizione dei dati** ottenuti dai singoli sensori.

I dati acquisiti dai diversi sensori possono essere associati a sistemi di riferimento diversi, quindi è necessaria la trasformazione dei dati in un sistema di riferimento globale attraverso matrici di rotazione!

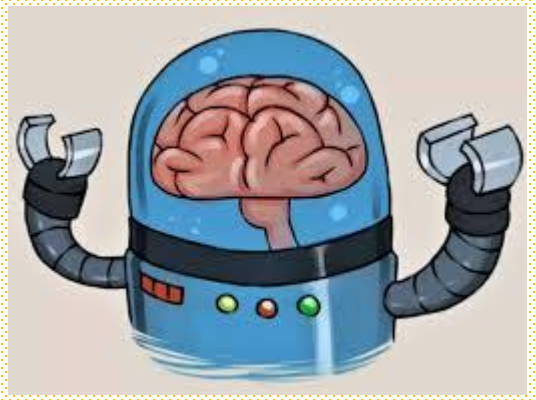
Sistema di Controllo

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

E’ un sistema automatizzato che implementa la capacità di **collegare in modo intelligente** la percezione dell’ambiente alle operazioni del robot.

Il **computer di bordo è il «cervello» del** robot, esso:

- Elabora i dati acquisiti dai sensori;
- Controlla e gestisce le operazioni del rover, coordinando gli attuatori per la navigazione e per raggiungere l’obiettivo della missione;
- Utilizza algoritmi per prendere decisioni in tempo reale;
- Comunica con la stazione di controllo a terra;
- Monitora le condizioni del rover.



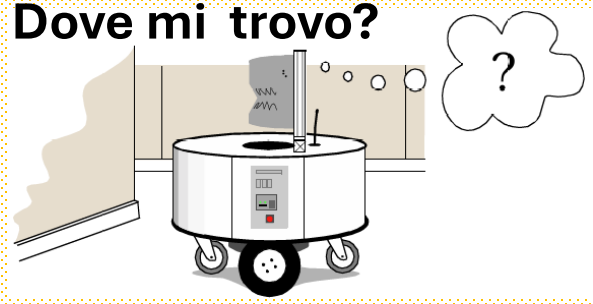
Esso dovrà quindi essere dotato di adeguata **potenza di calcolo**. Soluzioni hardware comunemente utilizzate nei robot agricoli sono basati su **processori Intel Core** spesso accoppiati con **schede grafiche NVIDIA**.

Localizzazione

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

E' il processo per determinare **la posizione e l'orientamento di un robot all'interno dell'ambiente in cui opera**, utilizzando i dati acquisiti dai sensori a bordo.

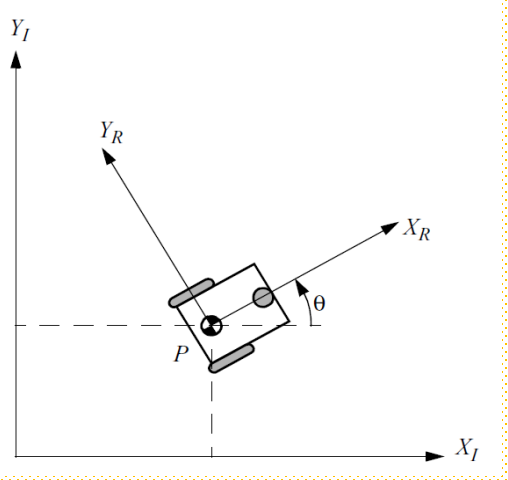
Dove mi trovo?



Un corpo libero di muoversi nello spazio 3D ha **6 gradi di libertà**:

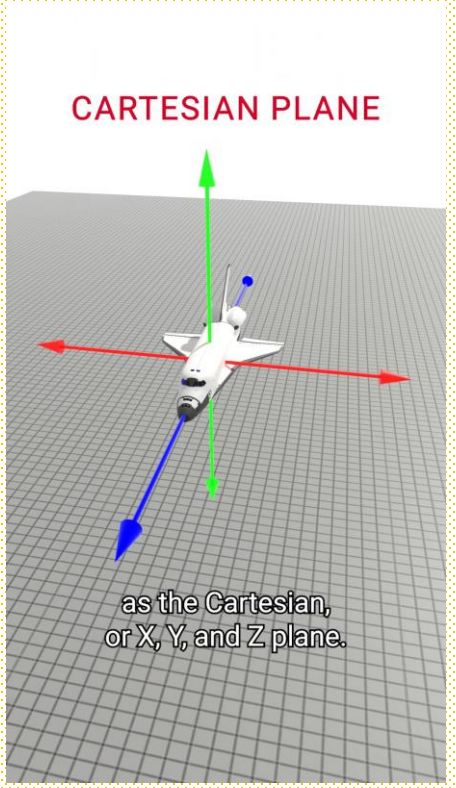
- **TRE TRASLAZIONALI:** consentono al corpo di muoversi senza ruotare lungo gli assi *x*, *y* e *z*
- **TRE ROTAZIONALI:** consentono al corpo di effettuare le rotazioni, questi sono chiamati rollio, beccheggio e imbardata.

POSA



In **scenari indoor** il rover si muove su una superficie che può essere considerata planare.

La **stima della posizione 2D e dell'angolo di l'imbardata** è **sufficiente** per la sua localizzazione.



Un terreno agricolo non può sempre essere considerato planare, è quindi fondamentale recuperare la posizione e l'orientamento del robot nello spazio 3D.

Tecniche di localizzazione

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

- **Odometria:** Stima la posa basandosi sulle misure effettuate dagli encoder presenti sui cingoli.

LIMITAZIONE Le imprecisioni e la deriva (accumulo di errori) aumentano nel tempo a causa dei dati rumorosi acquisiti dai sensori ed allo slittamento dei cingoli.

- **Unità di misura inerziali (IMU)**: Stima la posa basandosi sull'integrazione delle misure effettuate dall'IMU.

LIMITAZIONE A causa delle vibrazioni durante il movimento e di un doppio processo di integrazione, la stima della posa non è accurata e soffre di deriva.

- **Global navigation satellite system (GNSS):** Stima la posizione assoluta (es. con riferimento al sistema geodetico mondiale WGS84) del ricevitore misurando la distanza da almeno quattro satelliti.
  La costellazione GNSS più utilizzata è il Global Positioning System (GPS).

Singolo ricevitore

La posa stimata può essere affetta da errori dell'ordine di qualche metro.

Real-Time Kinematic GNSS

La posa del rover viene determinata rispetto ad una stazione di riferimento con una precisione centimetrica.

LIMITAZIONE Costo elevato e bassa affidabilità in presenza di vegetazione fitta.

Tecniche di localizzazione

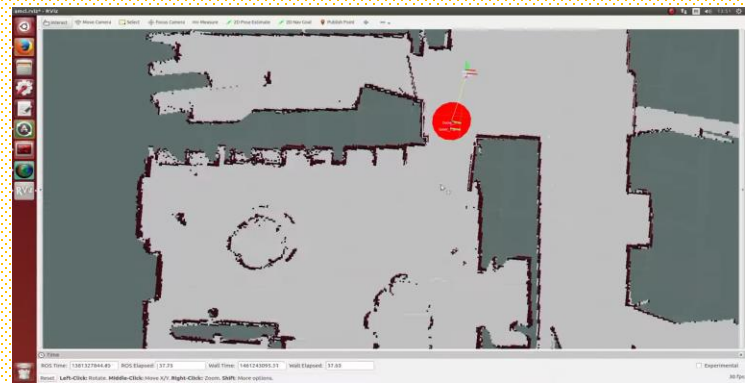
Università di Bari
Di.S.S.P.A.

- **Integrazione IMU + GNSS:** E' un approccio molto diffuso nella robotica agricola. Integrando le informazioni ottenute dal GNSS con l'assetto del rover fornito direttamente da un IMU, è possibile stimare con precisione la posa del rover.
- **Utilizzo di LiDAR:** l LiDAR vengono usati in combinazione con altri sensori (come GPS, IMU e camere) per migliorare l'accuratezza della localizzazione.

LIMITAZIONE In contesti agricoli non è semplice estrarre punti di riferimento dai dati LiDAR a causa della presenza di punti ciechi e vegetazione fitta.

- **Localizzazione probabilistica:** Il **filtro di Kalman** è un approccio molto utilizzato, esso integra i dati provenienti da diversi sensori (LiDAR, GPS, IMU), per ottenere una stima della posa più accurata. Questo approccio tratta la localizzazione come un problema di **stima dello stato** (posizione e velocità) **in due step**:

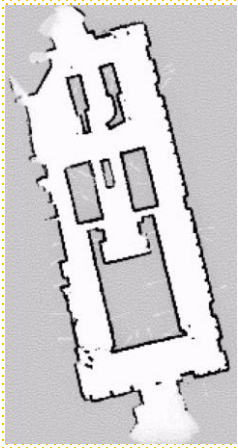
- ***Step di previsione:*** Basandosi sul modello dinamico del rover, il filtro predice il nuovo stato in un istante futuro;
- ***Step di aggiornamento:*** Quando arrivano nuovi dati dai sensori, il filtro integra queste informazioni correggendo la stima dello stato effettuata nello step precedente.



Rappresentazione della mappa dell'ambiente

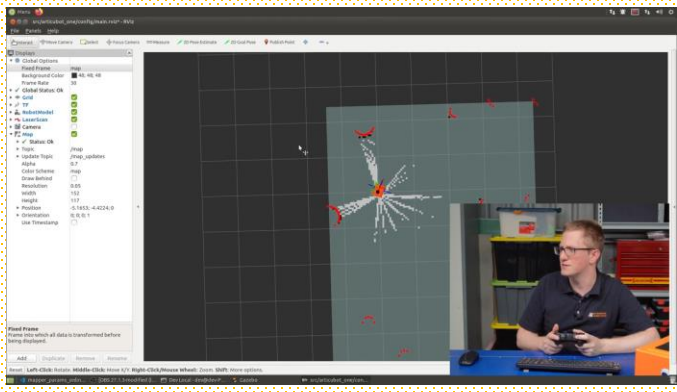
Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Le strategie di localizzazione viste utilizzano le **mappe dell'ambiente ottenute attraverso i sensori**, è dunque fondamentale partire da una **rappresentazione fedele della mappa**.



E' possibile definire diverse strategie per rappresentare una mappa, l'approccio più diffuso è la **discretizzazione**.

E' necessario considerare che la complessità della rappresentazione ha un impatto sulla **complessità computazionale** delle fasi di mappatura, localizzazione e navigazione.



Problema dello SLAM

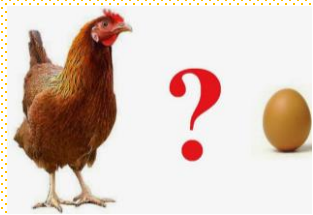
Con SLAM ci riferiamo **al problema del recupero la posa del rover**, ricostruendo **contemporaneamente l'ambiente circostante in 2D o 3D**.

Per una corretta localizzazione il rover deve conoscere la struttura dell'ambiente e la posizione degli ostacoli

⇄

Per costruire la mappa il rover deve conoscere dove è localizzato sulla mappa

Il problema dello SLAM è quindi un esempio del **problema dell'uovo e della gallina**.



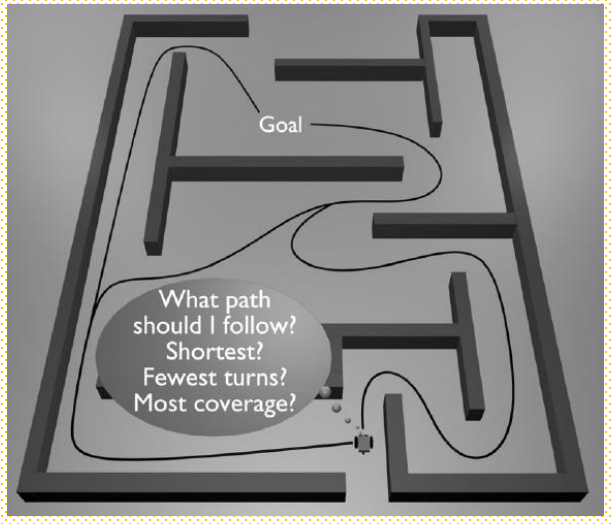
Pianificazione del percorso e Navigazione

Università di Bari
Di.S.S.P.A.

E' il processo di **identificazione di una traiettoria fisicamente percorribile** che permetta al robot di raggiungere una **destinazione nota, data la mappa dell'ambiente** in cui si trova e la posizione degli ostacoli presenti.

Implica una **corretta localizzazione del robot** e la **conoscenza della destinazione** in un sistema di riferimento globale.

I **terreni agricoli** rappresentano **ambienti sfidanti** per la **navigazione autonoma** di un rover poiché sono altamente **variabili** e **non strutturati**.



Pianificazione Globale

- Sfruttare i waypoint GNSS raccolti teleoperando il rover in campo. Se utilizzato in vigneti o frutteti, questa navigazione è accoppiata ad un algoritmo di inseguimento del filare;
- La navigazione in serra può essere realizzata utilizzando algoritmi di pianificazione in ambienti indoor strutturati;
- Può sfruttare approcci probabilistici, in cui i waypoints vengono selezionati e verificati ad ogni iterazione.

+

Pianificazione Locale

- E' basata sulle informazioni acquisite dai sensori, è necessaria per sopperire a imprecisioni nella mappa dell'ambiente o ad eventuali variazioni, nonché ad evitare ostacoli dinamici;
- La migliore traiettoria locale viene determinata valutando il percorso globale e la vicinanza agli ostacoli.

Visual Navigation

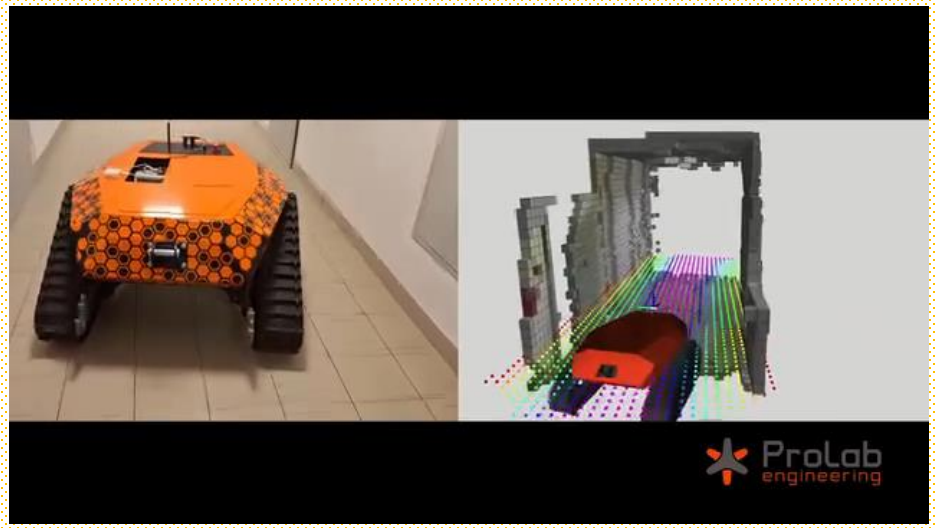
Università di Bari
Di.S.S.P.A.

Attualmente, la **navigazione autonoma** si basa prevalentemente su GPS, tuttavia in contesti agricoli **l'utilizzo del segnale GPS può presentare delle criticità** (aree remote o in condizioni meteorologiche avverse).

Una tecnica alternativa di navigazione è la **visual navigation** che si basa sull'**analisi delle immagini** dell'ambiente circostante raccolte da camere e sensori ottici. Le immagini **vengono elaborate tramite algoritmi di visione artificiale** per identificare caratteristiche distintive (come punti di interesse, linee o forme) nell'ambiente.

VANTAGGI

- Fornisce informazioni ricche e dettagliate dell'ambiente, utili per navigare in scenari complessi;
- Approccio flessibile e costi contenuti rispetto ai LiDAR.



LIMITAZIONI

- La performance può peggiorare in condizioni di scarsa illuminazione;
- L'elaborazione delle immagini richiede risorse computazionali significative;
- Oggetti che bloccano la visuale possono compromettere l'accuratezza della navigazione.

Applicazioni Rover terrestri

- **Automatizzazione di operazioni agricole**: I rover possono essere dotati di bracci robotici, utili ad automatizzare e rendere precise alcune operazioni agricole quali la **semina**, la **potatura** e la **raccolta**;

- **Sarchiatura automatizzato**: I rover possono essere utilizzati per **eliminare le erbacce** in modo mirato, senza danneggiare le colture. Grazie a tecniche di intelligenza artificiale, il rover può identificare e rimuovere le erbacce con strumenti di taglio.

DOBOT CR COBOT

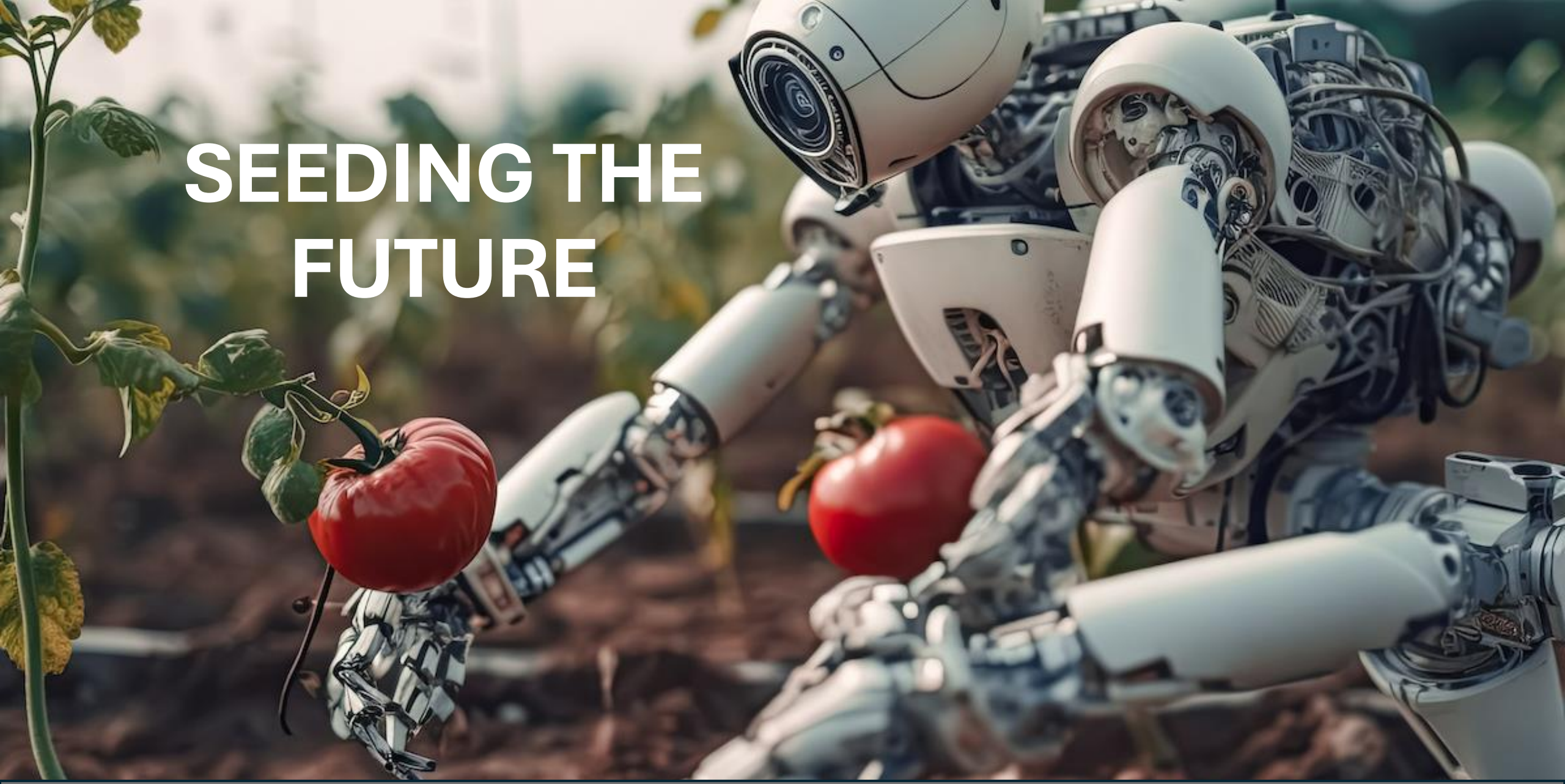
SoilHackers

- **Applicazione di pesticidi o fertilizzanti**: I rover possono essere dotati di **serbatoi** e strumenti per la distribuzione di pesticidi o fertilizzanti sulle colture, ed azionare in maniera autonoma e precisa gli ugelli;

- **Trasporto**: Alcuni rover sono utilizzati come **trattrici** per trasportare attrezzature agricole o carichi pesanti quindi devono avere una buona capacità di carico, al fine di ridurre il carico di lavoro fisico degli agricoltori.

HERCULES UGV-HR150 ROVER

AION ROBOTICS



Grazie a tutti per l'attenzione!