



**ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

**Dipartimento di Ingegneria Industriale**

Corso di Laurea in  
**Ingegneria Aerospaziale**

**Studio e sperimentazione di  
algoritmi di navigazione per  
velivoli multirottore in ambiente  
indoor**

Tesi di Laurea in Meccanica del Volo

**Relatore**  
Prof. Fabrizio Giulietti

**Presentata da**  
Morena Rodari

Sessione Luglio 2025  
Anno Accademico 2024 / 2025

# Indice

0.1	Introduzione . . . . .	7
<b>1</b>	<b>Il volo indoor e le sue caratteristiche</b>	<b>8</b>
1.1	Problematiche del GPS in ambienti chiusi . . . . .	8
1.2	Sostituti del GPS in ambienti chiusi . . . . .	9
1.2.1	Sistemi SLAM . . . . .	9
1.2.2	LiDAR . . . . .	11
1.2.3	Optical Flow . . . . .	11
1.2.4	IMU . . . . .	12
1.2.5	Sonar e infrarossi . . . . .	12
1.2.6	Hardware di protezione . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>14</b>
2.1	Flyability Elios 3 . . . . .	14
2.1.1	Conclusioni . . . . .	15
2.2	L-380 . . . . .	17
2.2.1	Conclusioni . . . . .	18
2.3	Terra Xross 1 . . . . .	20
2.3.1	Caratteristiche generali . . . . .	21
2.3.2	Conclusioni . . . . .	21
2.4	Multinnov Stereo 2 . . . . .	23
2.4.1	Specifiche Tecniche . . . . .	23
2.4.2	Vantaggi . . . . .	24
2.4.3	Svantaggi . . . . .	24
2.5	Confronto tra i droni indoor presi in considerazione finora . . . . .	25
2.6	Altri droni di fascia inferiore . . . . .	26
<b>3</b>	<b>Fase preliminaria</b>	<b>29</b>
3.1	Selezione della piattaforma SAPR e dei sensori . . . . .	29
3.2	DIJI F450 Frame . . . . .	30
3.2.1	Caratteristiche Generali . . . . .	30
3.2.2	Componenti ausiliari adottati . . . . .	30
3.3	Cube Black + . . . . .	31
3.3.1	Architettura dei Controllori in ArduPilot su Cube Black+ . . . . .	31
3.3.2	Extended Kalman Filter 3 (EKF3) . . . . .	33
3.3.3	Controllori per Obstacle Avoidance in ArduPilot . . . . .	34
3.3.4	Modalità di volo utilizzate per obstacle avoidance . . . . .	35

3.4	Scelta dei sensori . . . . .	37
3.4.1	Sensore LiDAR Benewake TFmini-S . . . . .	37
3.4.2	HereFlow Optical Flow sensor . . . . .	39
3.4.3	Teraranger Evo Tower . . . . .	41
3.5	Allestimento, calibrazioni e conclusioni . . . . .	43
3.5.1	Cube Black + . . . . .	43
3.5.2	Optical Flow . . . . .	43
3.5.3	LiDAR Benewake TFmini-S . . . . .	44
3.5.4	Teraranger Evo Tower . . . . .	44
3.5.5	Considerazioni finali sulla fase di calibrazione . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Fase di volo</b>	<b>46</b>
4.1	Allestimento dell'area predisposta al volo . . . . .	46
4.2	Svolgimento dell'esperimento . . . . .	48
4.3	Volo in ALTHOLD . . . . .	49
4.3.1	Conclusioni sulla prova di volo in ALTHOLD . . . . .	53
4.4	Prova di volo in Loiter . . . . .	54
4.5	Confronto sulle modalità di volo utilizzate . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>61</b>

# Elenco delle figure

1.1	Schema funzionamento LiDAR . . . . .	11
1.2	Un tipico sensore OpticalFlow . . . . .	12
1.3	Add-on Cage . . . . .	13
1.4	Decouple Cage . . . . .	13
1.5	Protezioni per eliche . . . . .	13
2.1	Flyability Elios 3 . . . . .	16
2.2	L-380 . . . . .	17
2.3	Terra Xross 1 . . . . .	20
2.4	Terra Xross 1 con tethering . . . . .	22
2.5	Multinnov Stereo 2 . . . . .	24
2.6	Diji Phantom 4 Pro . . . . .	27
2.7	Diji Mini 3 Pro . . . . .	27
2.8	Diji Mavic 2 . . . . .	27
2.9	DIJI Matrice 300 RTK + TOPODRONE LiDAR AVIA . . . . .	27
3.1	F450 Frame . . . . .	31
3.2	Schema dell'architettura di Ardupilot . . . . .	32
3.3	Funzionamento in Loiter . . . . .	36
3.4	Funzionamento in AltHold . . . . .	36
3.5	Sensore LiDAR Benewake TFmini-S . . . . .	37
3.6	Set up dei sensori Optical Flow e LiDAR sul drone . . . . .	40
3.7	Installazione Tower sul frame . . . . .	41
3.8	Dettaglio sensore e modalità di stabilizzazione della tower . . . . .	42
3.9	Condizione di malfunzionamento dell'Optical Flow . . . . .	43
3.10	Esempio di Proximity su Mission Planner . . . . .	44
3.11	Postazione di calibrazione della Tower . . . . .	45
4.1	Allestimento con ostacoli e markers . . . . .	47
4.2	Radio Futaba T18MZ e drone con eliche . . . . .	48
4.3	Dettaglio Avoidance in Rollio . . . . .	49
4.4	Dettaglio Avoidance in Beccheggio . . . . .	50
4.5	Funzionamento dell'optical flow sulle ascisse . . . . .	51
4.6	Funzionamento dell'optical flow sulle ordinate . . . . .	51
4.7	Distanza dal suolo rilevata dal LiDAR . . . . .	52
4.8	Dettaglio Obstacle Avoidance in Beccheggio . . . . .	54
4.9	Dettaglio Obstacle Avoidance in Rollio . . . . .	55
4.10	Funzionamento dell'Optical Flow sulle ascisse . . . . .	56

4.11	Funzionamento dell'Optical Flow sulle ordinate . . . . .	57
4.12	Distanza dal suolo rilevata dal LiDAR . . . . .	58
4.13	Drone in avvicinamento agli ostacoli . . . . .	60

# Elenco delle tabelle

2.1	Caratteristiche tecniche e funzionalità del drone Elios 3 . . . . .	15
2.2	Specifiche tecniche dettagliate del drone L-380 . . . . .	18
2.3	Specifiche tecniche del drone Terra Xross 1 . . . . .	21
2.4	Specifiche tecniche del Multinnov Stereo2 . . . . .	23
2.5	Confronto tecnico sintetico . . . . .	25
2.6	Confronto tra DJI Phantom 4 Pro, Mini 3 Pro e Mavic 2 Enterprise Advanced . . . . .	26
2.7	Confronto tra DJI Matrice 300 RTK e TOPODRONE LiDAR AVIA .	28
3.1	Specifiche tecniche del TF-mini S . . . . .	38
3.2	Specifiche tecniche dell'Optical Flow Here Flow . . . . .	39
3.3	Specifiche tecniche del TeraRanger Evo Tower . . . . .	42

## 0.1 Introduzione

Gli spazi confinati sono notoriamente ostili e hanno spesso ostacolato, nelle applicazioni industriali ad alto rischio, le prestazioni in materia di salute e sicurezza sul lavoro. L'approccio tradizionale alle attività di ispezione e monitoraggio risulta essere altamente pericoloso per gli operatori: in Italia viene annualmente rilevato un incremento del 4,7% relativo alle morti sul lavoro, soprattutto in ambito industriale; inoltre queste operazioni molto spesso richiedono svariati interventi fisici in condizioni ambientali estreme, in presenza di polveri sospese, elevata umidità e temperature, visibilità ridotta.

Nell'ambito, dunque, che definiamo di *remote sensing* (monitoraggio ambientale, protezione del territorio, prevenzione di catastrofi naturali), i Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto (SAPR), grazie alla loro flessibilità e semplicità d'uso, consentono di alleggerire, se non totalmente sostituire, l'operatore umano, con una conseguente riduzione dei costi e dei tempi di esecuzione, insieme al guadagno in sicurezza e prevenzione.

In questo elaborato verrà presentato un excursus su diversi tipi di SAPR presenti in commercio, di notevole pregio e costo, in contrapposizione ad altre tipologie decisamente meno complesse nel tentativo di capire se sia possibile ottenere risultati, se non simili almeno paragonabili, con una piattaforma disponibile presso il CIRI Aerospace, allestita con sensori opportunamente selezionati.

# Capitolo 1

## Il volo indoor e le sue caratteristiche

La pratica del volo indoor rappresenta una valida soluzione per compiere sopralluoghi nei siti industriali, all'interno dei quali spesso si presenta la necessità di ispezionare impianti costituiti da lunghe condotte, potenzialmente pericolose, e molto spesso inaccessibili all'operatore umano.

In termini di sensori e payload, l'allestimento di un SAPR prevede una serie di dispositivi che permettano al mezzo di completare la missione in sicurezza adattandosi a tutte le situazioni possibili secondo l'assegnato scenario operativo: a questo proposito, la conduzione di missioni in ambiente indoor, rispetto all'uso in spazi aperti esterni, presenta delle caratteristiche che portano ad una maggiore complessità del progetto e nella gestione del SAPR stesso.

Il primo aspetto da considerare è l'assenza di segnale GPS: questo comporta la necessaria presenza di sensori che permettano la navigazione e il corretto posizionamento del velivolo; inoltre diverse tipologie di ambienti (condotte fognarie, ciminiere) possono presentare caratteristiche di luminosità molto basse: è necessario quindi dotare i SAPR di un sistema in grado di orientarsi in queste condizioni.

Infine, un'ultima, ma non per importanza, problematica della navigazione indoor è rappresentata dalla presenza di ostacoli e superfici che, se urtati, possono danneggiare il velivolo o i suoi componenti: di conseguenza, il mezzo deve essere dotato di sensori in grado di percepire ostacoli e anche di sistemi di protezione in caso di impatto.

### 1.1 Problematiche del GPS in ambienti chiusi

Il **GPS** (Global Positioning System) presenta delle caratteristiche fisiche del segnale per le quali, a causa delle barriere strutturali che lo ostacolano, non può essere utilizzato efficacemente in ambienti indoor: i satelliti GPS orbitano a circa 20.200 km di altezza e trasmettono segnali radio molto deboli (tipicamente tra -125 e -130 dBm all'arrivo sul suolo), che possono essere facilmente assorbiti o riflessi da materiali da costruzione come cemento, acciaio, vetro o legno. Ne consegue che in ambienti chiusi il segnale si mostri spesso assente o troppo debole per essere utilizzato o addirittura percepito: anche nel caso improbabile in cui un segnale GPS riesca a penetrare al-

l'interno di un'edificio, 'rimbalzerebbe' sulle pareti, causando effetti di *multipath*, che si manifesta quando più segnali riflessi contemporaneamente sono ricevuti in tempi diversi a causa di rifrazione contro gli ostacoli in cui si imbattono, introducendo errori nella posizione calcolata e compromettendo in maniera sostanziale l'affidabilità del sistema.

## 1.2 Sostituti del GPS in ambienti chiusi

Tenendo conto della non fruibilità del GPS in aree inaccessibili e isolate, l'unico modo per permettere l'utilizzo dei SAPR e consentire al pilota di poter svolgere il proprio lavoro da remoto, anche senza visibilità diretta del sito, è mettere in dotazione sensori ad hoc e, in casi più raffinati, telecamere integrate e luci molto potenti.

Tra queste tecnologie si annoverano:

- Sistemi SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) con sensori LiDAR;
- Optical Flow;
- Sensori ultra sonici e infrarossi;
- IMU (Inertial Measurement Unit);
- Hardware di protezione fisica.

### 1.2.1 Sistemi SLAM

La tecnologia **SLAM** (*Simultaneous location and mapping*), estremamente complessa e performante, permette a un drone di costruire una mappa tridimensionale dell'ambiente circostante mentre determina simultaneamente la propria posizione all'interno di esso: questo processo avviene grazie all'elaborazione dei dati provenienti da sensori come LiDAR, telecamere, sensori di profondità e IMU. Il sistema deve stimare simultaneamente:

- La traiettoria del drone, cioè la sua posizione e orientamento nel tempo;
- La mappa dell'ambiente, compresa di ostacoli e muri.

Tramite IMU, LiDAR ed eventuali camere, altimetri e barometri, il sistema raccoglie dati sull'ambiente e sul moto e crea una stima iniziale della posizione relativa del drone.

In seguito inizia il vero e proprio processo di **mapping**, che restituisce diversi risultati:

- Mappe di occupazione 2D/3D sotto forma di griglie o più comunemente nuvole di punti;
- Mappe semantiche, che aggiungono informazioni a parole etichettando gli ostacoli come per esempio "parete", "porta", "persona";

- Mappe *Dense* o *Sparse*: il primo caso offre grande accuratezza ma anche grande costo computazionale, nel secondo caso invece solo alcuni punti vengono resi visibili.

Quando il drone torna su una zona già visitata, di cui di conseguenza è già disponibile una mappatura, si verifica il fenomeno del **loop closure**: la piattaforma verifica quando il drone ritorna in un punto già noto e il sistema lo riconosce: in siffatta maniera corregge il drift accumulato nella traiettoria e allinea la nuova mappa a quella precedente, migliorando la precisione complessiva di localizzazione e mappatura.

Il sistema, dunque, confronta la nuova posizione stimata con posizioni passate salvate nella mappa: se sono geometricamente vicine, entro una certa soglia ammissibile, si ipotizza un possibile loop. Se ci addentriamo nella casistica di un LiDAR SLAM, si ragiona in termini di confronto tra le nubi di punti generate a ogni passaggio: se la trasformazione tra le due pose è coerente, il loop è validato e viene aggiunto un vincolo tra queste nel *Graph Slam*, cioè il grafo che rappresenta l'intero problema di localizzazione insieme alla mappatura. Alla luce di quanto appena visto, sussistono inevitabilmente problematiche comuni in cui ci si potrebbe imbattere:

- **Falsi positivi**: due luoghi simili ma distinti vengono confusi, creando un errore grave nella mappa;
- **Falsi negativi**: il loop non viene rilevato e vi è un drift continuo della traiettoria del drone.

Per ridurre al minimo queste criticità, i sistemi SLAM includono una parte di ottimizzazione, *back-end*, che elabora le pose stimate del drone, date da posizione e orientamento, e i vincoli forniti da odometria, loop closure, misure dei sensori, e costruisce un Graph SLAM ottimizzato: l'obiettivo è minimizzare l'errore tra le pose stimate del drone e le misure osservate, espresse come trasformazioni rigide tra pose. Matematicamente si ottiene:

$$\min_{\{T_i\}} \sum_{i,j} \|T_j^{-1}T_i \cdot z_{ij}^{-1}\|^2 \quad (1.1)$$

dove:

- $T_i, T_j$  sono le pose del drone nei tempi  $i$  e  $j$ , espresse come trasformazioni rigide;
- $z_{ij}$  è la trasformazione osservata tra le pose  $i$  e  $j$ ;
- la norma  $\|\cdot\|^2$  misura la distanza tra la trasformazione composta  $T_j^{-1}T_i$  e la misura  $z_{ij}$ , spesso attraverso un logaritmo o una distanza euclidea su parametri minimali.

Lo scopo finale dell'ottimizzazione è di produrre una mappa globalmente coerente e una stima raffinata della traiettoria del drone.

## 1.2.2 LiDAR

Il LiDAR (Light Detection and Ranging) è una tecnologia di telerilevamento che utilizza impulsi laser per misurare distanze e creare modelli tridimensionali precisi dell'ambiente circostante, formata da due componenti chiave:

- Trasmettitore;
- Ricevitore.

Il **trasmettitore** emette fino a centinaia di migliaia di impulsi di luce laser nella direzione della superficie che viene scansionata: una volta che un impulso raggiunge la superficie, rimbalza tornando indietro o viene retrodiffuso, permettendo al segnale di essere rilevato dal **ricevitore**. Per misurare il tempo di ritorno, vi è un cronometro elettronico che rileva quanto tempo impiega l'impulso per viaggiare dal sensore alla superficie bersaglio e tornare, calcolando il ritardo nel ritorno del segnale: maggiore è il ritardo, più lontana è la superficie dal sensore (scansione laser a tempo di volo).

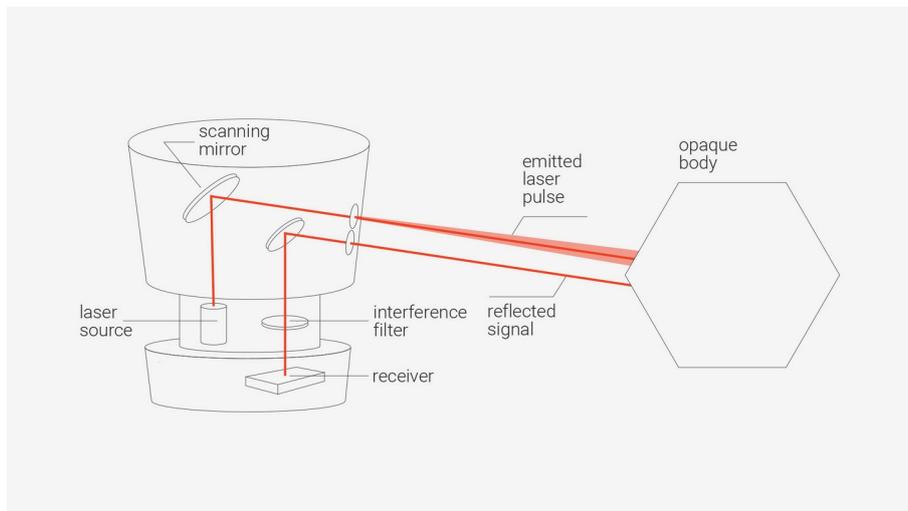


Figura 1.1: Schema funzionamento LiDAR

## 1.2.3 Optical Flow

L'optical flow è una tecnica fondamentale nella computer vision che consente di stimare il movimento apparente di oggetti, superfici e bordi in una scena visiva, causato dal movimento relativo tra un osservatore e la scena stessa.

L'optical flow rappresenta un campo vettoriale bidimensionale in cui ogni vettore descrive il movimento di un punto dell'immagine tra due fotogrammi consecutivi.

Il funzionamento dell'optical flow si basa sull'assunzione che la luminosità di un punto dell'immagine rimanga costante tra due fotogrammi consecutivi, nonostante il movimento: utilizzando questa ipotesi, è possibile calcolare la direzione e la velocità del movimento di ogni punto nell'immagine.



Figura 1.2: Un tipico sensore OpticalFlow

### 1.2.4 IMU

L' **Unità di Misura Inerziale** (Inertial Measurement Unit, IMU) è un dispositivo elettronico integrato che misura e riporta la forza specifica, la velocità angolare e, in alcuni casi, l'orientamento di un corpo, utilizzando una combinazione di accelerometri, giroscopi e talvolta magnetometri (se è presente il GPS). Un'IMU tipica include:

- Accelerometri, che misurano l'accelerazione lineare lungo ciascun asse;
- Giroscopi, che misurano la velocità angolare attorno a ciascun asse;

Questi sensori lavorano insieme per fornire dati completi sul movimento e l'orientamento dell'oggetto nello spazio tridimensionale.

### 1.2.5 Sonar e infrarossi

I sensori a infrarossi rilevano la radiazione termica emessa dagli oggetti. Ne esistono due principali tipologie:

- *Sensori IR passivi (PIR)*: rilevano variazioni di calore nel campo visivo, utilizzando materiali piroelettrici che generano una carica elettrica in risposta a cambiamenti di temperatura.
- *Sensori IR attivi*: emettono un raggio infrarosso e misurano la riflessione per determinare la presenza o la distanza di un oggetto.

Il **Sonar** (Sound Navigation and Ranging) utilizza onde sonore per rilevare oggetti e misurare distanze. Si distingue in:

- *Sonar attivo*: emette impulsi sonori e analizza gli echi riflessi dagli oggetti per determinarne la posizione e la distanza.
- *Sonar passivo*: rileva i suoni emessi dagli oggetti circostanti senza emettere segnali propri.

## 1.2.6 Hardware di protezione

Nonostante la presenza di molteplici sensori, per garantire la sicurezza e l'integrità dei droni durante il volo in ambienti indoor, è fondamentale dotarli di sistemi di protezione adeguati, che non solo proteggano il drone da danni causati da collisioni, ma che salvaguardino anche l'ambiente circostante e le persone presenti.

Le **gabbie di protezione** sono strutture che avvolgono completamente il drone, permettendogli di operare in spazi ristretti e complessi e di continuare a volare anche dopo impatti accidentali. Vi sono diverse tipologie di gabbie, come le *Add-on Cages*, progettate come protezione supplementare su droni preesistenti, o le *Gabbie Decouple*, progettate per assorbire gli urti separatamente dal corpo del drone.



Figura 1.3: Add-on Cage



Figura 1.4: Decouple Cage

Le **protezioni per eliche** sono invece accessori che circondano le eliche del drone, prevenendo danni caso di contatto, mentre le **reti di sicurezza** vengono utilizzate per delimitare l'area di volo dei droni, garantendo che rimangano all'interno di uno spazio sicuro e prevenendo incidenti. Sono spesso impiegate in ambienti di test, eventi o aree urbane densamente popolate; inoltre possono essere realizzate su misura per adattarsi a diverse dimensioni e forme di aree di volo.



Figura 1.5: Protezioni per eliche

# Capitolo 2

## Stato dell'arte

In questo capitolo viene presentata una rosa di SAPR per volo indoor tra le opzioni sul mercato: si sono scelti sia modelli di altissima gamma, dotati di sistemi molto sofisticati e in grado di svolgere missioni in scenari complessi, sia altri di fasce inferiori. L'intento finale è dimostrare la varietà delle piattaforme disponibili, che riescano a soddisfare le richieste del pubblico sia in contesti altamente specializzati sia amatoriali, permettendo un ampio approccio al mondo del volo indoor.

### 2.1 Flyability Elios 3

Il primo modello presentato, di altissima fascia, è il drone **Flyability Elios 3**. Questo multirottore è progettato per operazioni di ispezione e mappatura in ambienti confinati, industriali e privi di segnale GPS e vanta sistemi di navigazione e stabilizzazione avanzati, volti a massimizzarne l'efficacia durante le missioni indoor. Il sensore LiDAR combinato a un motore grafico Nvidia permette al drone di generare mappe 3D in tempo reale e di visualizzare l'ambiente circostante.

Il sistema di stabilizzazione, basato sulla tecnologia SLAM (Simultaneous localization and mapping), cattura anche i movimenti più impercettibili causati dai disturbi esterni e fornisce al controllore di volo istruzioni su come compensarli: ciò permette al multirottore di volare efficacemente in ambienti con condizioni sfavorevoli, anche in mano a piloti non troppo esperti.

I dati elaborati dal LiDAR vengono direttamente inviati sotto forma di mappa 3D allo schermo dell'operatore, in modo da fornire consapevolezza riguardo al posizionamento del drone in tempo reale ed eventuali problemi di scansione. Un'importante novità rispetto al modello precedente, già top di gamma, è il vano di carico modulare, che supporta ulteriori payload aggiuntivi. Una caratteristica interessante di questo dispositivo è la capacità di invertire il senso di rotazione dei motori durante le collisioni, per evitare il capovolgimento del drone.

La gabbia protettiva, che assicura la protezione del dispositivo da polvere e schizzi d'acqua, risulta lievemente più ingombrante rispetto ad altri modelli: ciò ne penalizza l'applicazione negli ambienti il cui passaggio è 400mm o meno. All'esterno della gabbia vi è sia un sistema di illuminazione, qui posizionato per ridurre i riflessi, sia dei condotti coprimotore in grado di diminuire la rumorosità fino a 20 decibel; inoltre, il nuovo meccanismo di inserimento e blocco facilita la rapida sostituzione

della batteria, rendendola semplice e immediata.

Il prezzo di questo modello parte da 50.000 dollari per il modello base fino a superare i centomila per le versioni con payload più sofisticati, rendendola una soluzione sia molto performante ma anche estremamente costosa e non particolarmente accessibile.

<b>Caratteristica</b>	<b>Specifiche</b>
<b>Caratteristiche Generali</b>	
Struttura	Gabbia protettiva in carbonio
Stabilizzazione	SLAM + VIO
Collisioni sicure	Fino a 2.4 m/s
Autonomia	11.5 min standard, 9.1 min con LiDAR
Velocità massima	7 m/s
Altitudine operativa	Da -3000 a +3000 m
Dimensioni	48 x 38 cm
Peso (con LiDAR)	2412 g
<b>Sistema di Navigazione e LiDAR</b>	
Tecnologia	Ouster OS0, 128 beam
Portata	Fino a 100 m
Precisione	$\pm 6$ mm
Drift SLAM	$< 0.5\%$
<b>Telecamera Visiva e Termica</b>	
Risoluzione visiva	4K, sensore 12 MP, GSD fino a 0.18 mm/px
Termocamera	FLIR Lepton 3.5, 160×120 px, $\pm 5\%$ o $\pm 5^\circ\text{C}$
<b>Payload Aggiuntivi</b>	
Ultrasuoni UT	Misurazione spessori ( $\pm 0.1$ mm)
RAD	Mappatura radioattività (0.05 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 Sv/h)
Gas Sensor	Rilevamento LEL% e oltre 14 gas infiammabili
<b>Illuminazione e Controllo</b>	
Illuminazione	LED 16.000 lumen, modalità polverosa e obliqua
Tablet	Samsung Galaxy S7/S8, autonomia 5h
Distanza operativa	Fino a 500 m in linea visiva
<b>Software e Funzionalità Avanzate</b>	
Flyaware SLAM	Navigazione real-time
Inspector / FARO Connect	Analisi dati e point cloud
Training Simulator	Formazione interattiva gratuita

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche e funzionalità del drone Elios 3

### 2.1.1 Conclusioni

Il drone Elios 3 è una piattaforma altamente efficiente e prestante ottima per ispezioni industriali, mappature in miniere e tunnel, per garantire le misure di sicurezza

in impianti ad alto rischio riducendo l'esposizione umana.

**Vantaggi:**

- Il sistema SLAM integrato con sensore LiDAR Ouster OS0-32 consente la creazione di mappe 3D in tempo reale, migliorando la consapevolezza spaziale del pilota e la precisione delle ispezioni;
- La struttura con gabbia protettiva e motori a inversione rapida permette al drone di recuperarsi autonomamente in caso di capovolgimento, rendendolo ideale per ambienti industriali complessi;
- I potenti LED da 16.000 lumen offrono visibilità eccellente anche in ambienti bui o polverosi, con modalità di illuminazione adattive per diverse condizioni;
- La baia di carico modulare consente l'integrazione di sensori aggiuntivi, come termocamere, rilevatori di gas o spessimetri, aumentando la versatilità del drone di concerto con l'autonomia di volo migliorata.

**Svantaggi:**

- Il costo elevato, superiore ad altri droni per ispezioni indoor;
- Il peso di circa 2.350 g (con LiDAR), è maggiore rispetto ad altri modelli, potenzialmente influenzando la manovrabilità in spazi molto ristretti;
- L'autonomia di volo si riduce a circa 10 minuti quando si utilizzano sensori aggiuntivi, richiedendo pianificazioni precise delle missioni.



Figura 2.1: Flyability Elios 3

## 2.2 L-380

Il drone **L-380** è un sistema compatto progettato per operazioni di ispezione e mappatura tridimensionale in ambienti indoor, spazi confinati, impianti industriali e infrastrutture sotterranee. È equipaggiato con un sistema LiDAR 3D ad alta precisione, capace di acquisire nuvole di punti con risoluzione fino a 2, consentendo la generazione di modelli digitali accurati anche in condizioni ambientali critiche.

Appartenente a una fascia di costo inferiore rispetto all'Elios 3, l'L-380 integra comunque una trasmissione video in tempo reale in risoluzione **1080p**, supportata da un modulo di comunicazione a bassa latenza adatto a operazioni in ambienti indoor. Il sistema di illuminazione è costituito da LED ad alta intensità con una potenza complessiva di **16 000 lumen**, regolabili e direzionabili, che consentono una visibilità ottimale anche in ambienti completamente bui o polverosi.

La post-elaborazione dei dati LiDAR avviene tramite software dedicato, con possibilità di esportazione; inoltre il drone è dotato di una **gabbia protettiva integrale in fibra di carbonio**, che assicura una resistenza elevata agli urti e consente di operare in ambienti con presenza di ostacoli ravvicinati. Il design chiuso consente al drone di **rimbalzare** in sicurezza contro pareti e strutture, preservando l'integrità del payload e mantenendo la stabilità di volo.

Dal punto di vista dimensionale, la piattaforma presenta un diametro massimo di soli **380 mm**, risultando particolarmente adatta ad accedere a intercapedini e condotti ristretti. La batteria assicura un'autonomia operativa fino a **12 minuti**, con possibilità di sostituzioni rapide per operazioni continuative. Nel complesso, l'L-380 rappresenta una soluzione agile e versatile per l'ispezione tecnica, combinando dimensioni compatte, resistenza agli urti, acquisizione tridimensionale avanzata e costi relativamente contenuti rispetto ai top di gamma del settore, circa 50.000\$.



Figura 2.2: L-380

<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>
<b>Specifiche Tecniche Generali</b>	
Configurazione	Quadcopter
Dimensioni	Contorno esterno < 380 mm
Peso	1700 g (inclusa batteria)
Modalità di volo	LiDAR-SLAM, ATTI-Attitude
Durata del volo	Oltre 14 minuti
Velocità salita/discesa	2 m/s (SLAM), 5 m/s (Attitude)
Peso massimo al decollo	2000 g
Resistenza al vento	3 m/s (SLAM), 5 m/s (Attitude)
Materiali	Fibra di carbonio, termoplastico di alta qualità
Rumore	85 dB
<b>Motorizzazione e Sistema a Bordo</b>	
Motore	Brushless
Computer di bordo	Sistema operativo Linux Kernel
Temperatura operativa	0°C – 50°C
Eliche	8 eliche a 3 pale, diametro 5 pollici
Volo autonomo	Supportato
<b>Sistema Video e Comunicazione</b>	
Sensore	1/1.7 pollici
Risoluzione	48 MP
Video	1080p H.265 HD
Campo visivo (FOV)	155° grandangolare
Latenza	30 ms
Distanza trasmissione	Fino a 10 km (area aperta)
<b>LiDAR</b>	
Lunghezza d'onda	905 nm
Sicurezza oculare	Classe 1
Distanza minima oggetto	0.1 m
Densità nuvola di punti	200.000 punti/s
Raggio di rilevamento	40 m
<b>Batteria</b>	
Tempo sostituzione	Inferiore a 10 secondi
Tipo	Batteria 4S agli ioni di litio
Cicli di carica	Meno di 30
Capacità	8200 mAh
Peso	421 g

Tabella 2.2: Specifiche tecniche dettagliate del drone L-380

### 2.2.1 Conclusioni

In conclusione, il **L-380** si configura come una soluzione compatta, efficiente e versatile per operazioni di ispezione e mappatura indoor.

Grazie a una struttura leggera, al sistema LiDAR integrato, all'autonomia estesa e alle capacità di navigazione autonoma, rappresenta un'alternativa tecnologicamente avanzata ma economicamente più accessibile rispetto all'Elios 3, mantenendo comunque un'elevata qualità nei dati acquisiti e nelle prestazioni operative.

### **Vantaggi**

- LiDAR 3D preciso e veloce;
- Design compatto e protetto per ambienti angusti;
- Elevata qualità video e ampia trasmissione;
- Sostituzione batteria rapida.

### **Svantaggi**

- Autonomia limitata;
- Cicli di carica batteria relativamente bassi;
- Costo comunque elevato.

## 2.3 Terra Xross 1

Il **Terra Xross 1** è un drone professionale progettato anch'esso in maniera specifica per operazioni di ispezione in ambienti confinati. La piattaforma combina un design compatto e robusto con una serie di sensori avanzati per la navigazione autonoma e la raccolta di dati tridimensionali ad alta risoluzione.

Tra le sue principali innovazioni si annovera l'impiego di un sistema di **odometria visiva (VIO)**, integrato con un **LiDAR a scansione 3D**, che consente una navigazione stabile anche in ambienti privi di segnale GNSS. I dati raccolti vengono elaborati attraverso una piattaforma *cloud-based*, che permette non solo la visualizzazione e gestione remota delle ispezioni, ma anche la condivisione e collaborazione multiutente su modelli 3D e nuvole di punti.

Come abbiamo avuto modo di notare nei modelli trattati precedentemente, uno degli aspetti più critici nelle operazioni indoor è l'autonomia: a differenza di molte piattaforme simili che soffrono di limitata capacità energetica, il Terra Xross 1 è dotato di un sistema ibrido di alimentazione, che alla batteria Li-ion ad alta capacità affianca un modulo di **alimentazione via tethering**, che garantisce operazioni prolungate e continuità nelle missioni critiche, eliminando i vincoli legati alla durata delle celle. Per concludere, il drone è equipaggiato con una **fotocamera 4K** capace di riprese ad altissima definizione, e un'illuminazione integrata ad alta intensità che garantisce ottima visibilità anche in ambienti completamente bui o polverosi.

Con un prezzo di listino che si aggira attorno ai 25.000 USD, il Terra Xross 1 rappresenta una soluzione economicamente vantaggiosa rispetto a piattaforme di fascia alta come l'Elios 3, pur offrendo una dotazione tecnica avanzata e una notevole flessibilità operativa.



Figura 2.3: Terra Xross 1

### 2.3.1 Caratteristiche generali

Parametro	Valore
<b>Caratteristiche Generali</b>	
Peso	1800 g
Dimensioni	36 × 31 × 21 cm
Autonomia di volo	10 min (estendibile via tether)
Velocità massima	2.5 m/s
Resistenza al vento	Fino a 3 m/s
Temperatura operativa	0°C – 45°C
Frequenza operativa	2.4 GHz
Protezione	Resistente alla polvere
<b>Batteria</b>	
Capacità	5200 mAh
Tensione nominale	18.5 V
Energia	99.4 Wh
Tempo di ricarica	Circa 1 ora
<b>Fotocamera</b>	
Sensore	CMOS 1/1.7", 8 MP
Risoluzione video	4K (3840×2160) @ 25 fps
Inclinazione	180° verticale
Illuminazione integrata	LED ad alta intensità
<b>LiDAR</b>	
Classe laser	Classe 1 (sicuro per gli occhi)
Portata	40 m @10% – 70 m @80%
Precisione	±2 cm a 10 m
Frequenza di scansione	10 Hz
Densità punti	200.000 pt/sec
<b>Controller</b>	
Dimensioni	217 × 106.5 × 31 mm
Peso	536 g

Tabella 2.3: Specifiche tecniche del drone Terra Xross 1

### 2.3.2 Conclusioni

In sintesi, il **Terra Xross 1** si configura come una soluzione altamente specializzata per l'ispezione indoor, coniugando compattezza strutturale, navigazione autonoma avanzata e capacità di acquisizione dati di elevata precisione.

L'integrazione tra LiDAR, odometria visiva e piattaforma cloud consente un'efficiente raccolta ed elaborazione dei dati.

Grazie alla possibilità di estendere l'autonomia tramite alimentazione tethered e al prezzo competitivo rispetto ad altre soluzioni, il Terra Xross 1 rappresenta una

scelta solida per applicazioni in ambito industriale, civile e infrastrutturale, dove affidabilità, dettaglio e continuità operativa sono requisiti fondamentali.

### **Vantaggi**

- Navigazione autonoma stabile grazie a odometria visiva e LiDAR.
- Fotocamera 4K con LED integrati per visibilità in ambienti bui.
- Piattaforma cloud per gestione e condivisione dati.
- Alimentazione con modulo tether per voli prolungati.
- Prezzo intorno a 25.000 USD.

### **Svantaggi**

- Autonomia limitata a 10 minuti senza tether.
- Velocità moderata (2,5 m/s).
- Peso e dimensioni non ideali per ambienti molto stretti.

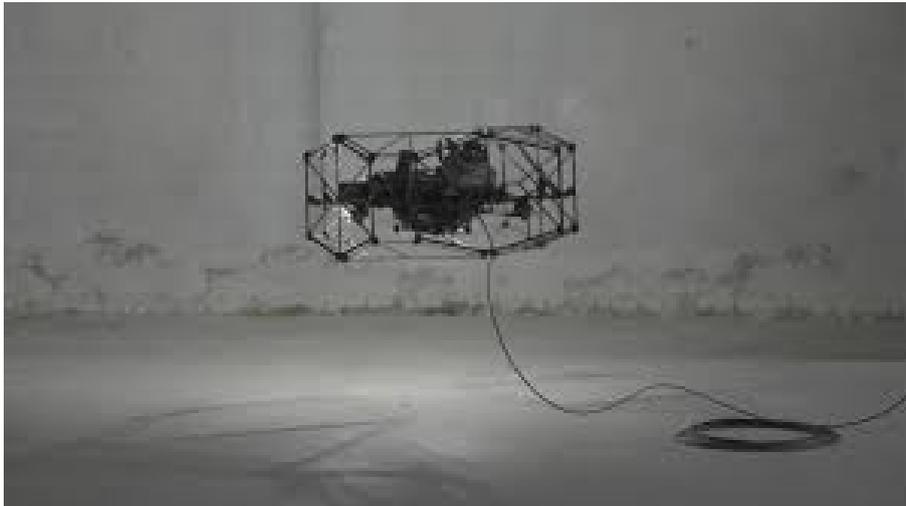


Figura 2.4: Terra Xross 1 con tethering

## 2.4 Multinnov Stereo 2

Il **Multinnov Stereo 2** è un drone professionale sviluppato appositamente per operazioni di ispezione visiva indoor. La sua struttura compatta, con un diametro massimo di 39 cm, unita a una robusta gabbia protettiva antiurto, lo rende particolarmente adatto a volare in ambienti angusti dove il rischio di collisione è elevato. A differenza di piattaforme dotate di LiDAR, il Multinnov Stereo 2 si basa su un sistema stereoscopico di stabilizzazione e mappatura, che sfrutta un set di videocamere ad alta definizione in configurazione binoculare per ricostruire l'ambiente circostante in 3D. Questo sistema di navigazione ottica consente al drone di rilevare pareti, strutture e ostacoli in tempo reale, mantenendo una distanza costante da esse, e di salvare la traiettoria percorsa per consentire all'operatore di visualizzare e mappare l'ambiente in post-processing.

La navigazione assistita da stereoscopia, sebbene efficace in molti scenari, comporta un maggiore assorbimento energetico rispetto ai sistemi tradizionali, soprattutto per l'elaborazione continua delle immagini e l'alimentazione dei potenti LED integrati per l'illuminazione. Questo si traduce in una autonomia di volo limitata a circa 12 minuti, che tuttavia è sufficiente per compiere ispezioni brevi e mirate in spazi critici.

Dal punto di vista economico, il Multinnov Stereo 2 si posiziona in una fascia più accessibile rispetto ai droni dotati di LiDAR o SLAM avanzato: con un prezzo di circa **10.000 USD**, rappresenta una soluzione entry-level affidabile per chi necessita di uno strumento di ispezione visiva ad alta risoluzione senza affrontare investimenti molto elevati.

### 2.4.1 Specifiche Tecniche

Caratteristica	Valore
Diametro	39 cm
Peso	1,5 kg
Autonomia di volo	Fino a 12 minuti
Stabilizzazione	Stereoscopica con odometria
Navigazione	GPS-denied, controllo ottico
Fotocamera	4K / 30 fps
Trasmissione video	1080p in tempo reale
Campo visivo	180° con camera orientabile
Illuminazione	10.000 lumen (4 LED regolabili)
Protezione	Gabbia in fibra di carbonio
Compatibilità software	Pix4D, Agisoft Metashape
Funzionalità aggiuntive	Fotogrammetria 3D, generatore di fumo
Prezzo indicativo	9.500 €

Tabella 2.4: Specifiche tecniche del Multinnov Stereo2

### 2.4.2 Vantaggi

- Ideale per ambienti confinati e privi di GPS.
- Stabilizzazione avanzata tramite visione stereoscopica e odometria.
- Gabbia protettiva in fibra di carbonio per urti e collisioni.
- Fotocamera 4K e visione in tempo reale ad alta qualità (1080p).
- Illuminazione potente fino a 10.000 lumen per ambienti bui o polverosi.
- Compatibilità con software di fotogrammetria per mappatura 3D.
- Prezzo contenuto rispetto a soluzioni con LiDAR.

### 2.4.3 Svantaggi

- Autonomia limitata a 12 minuti.
- Assenza di sensore LiDAR integrato (solo visione stereo).
- Non indicato per spazi estremamente ampi o inaccessibili senza visibilità.



Figura 2.5: Multinnov Stereo 2

## 2.5 Confronto tra i droni indoor presi in considerazione finora

Caratteristica	Elios 3	L-380	Terra Xross 1	Multinnov Stereo2
Peso	2.4 kg	2.3 kg	1.8 kg	1.5 kg
Autonomia	12 min	14 min	10 min (estendibile)	12 min
LiDAR	Ouster OS0-32	integrato	200k pt/sec	solo stereo
Fotocamera	4K + termica	4K	4K (180° tilt)	4K (180° FOV)
Illuminazione	16k lumen	16k lumen	LED integrati	10k lumen
Stabilizzazione	SLAM + IMU	LiDAR-based	LiDAR+ odo	Stereo + odo
Gabbia protettiva	completa	esterna	esterna	carbonio
Prezzo indicativo	45–150k €	50–55k €	< 25k €	9.5k €
Note	Payload modulare	Struttura robusta	Tether + Cloud	Economico

Tabella 2.5: Confronto tecnico sintetico

Il confronto tra i droni trattati finora evidenzia differenze significative in termini di configurazione, sensori, autonomia e fascia di prezzo.

L'**Elios 3** rappresenta la soluzione più avanzata e versatile, dotato di un sistema LiDAR ad alta risoluzione (Ouster OS0-32), doppia fotocamera (visiva 4K e termica), una potente illuminazione da 16.000 lumen e una completa gabbia protettiva. Il sistema di stabilizzazione, basato su SLAM e IMU, consente una navigazione precisa anche in ambienti complessi. Il prezzo, variabile tra i 45.000 e i 150.000 euro a seconda del payload, riflette la sua natura orientata a contesti industriali ad alta criticità, collocandolo però tra modelli non propriamente accessibili.

Il **L-380**, pur collocandosi in una fascia di prezzo simile (circa 50–55.000 euro), offre caratteristiche leggermente inferiori in termini di flessibilità: mantenendo lo stesso livello di illuminazione dell'Elios 3 e una buona stabilizzazione basata su LiDAR, si distingue per un'autonomia superiore (14 minuti) e per un design leggermente più compatto.

Il **Terra Xross 1**, dal costo notevolmente più contenuto (inferiore ai 25.000 euro), integra una serie di funzionalità pensate per ottimizzare le operazioni indoor: un LiDAR da 200.000 punti al secondo, una fotocamera 4K inclinabile a 180°, e una gestione dell'alimentazione ibrida (batteria + tether), che consente estensione dell'autonomia senza interruzioni.

Infine, il **Multinnov Stereo 2** si presenta come l'opzione più economica (circa 9.500 euro), rinunciando al LiDAR a favore di una navigazione ottica stereoscopica. È il più leggero dei quattro (1.5 kg), con dimensioni contenute e una buona qualità video; tuttavia, l'assenza del LiDAR limita la precisione nella generazione di mappe tridimensionali in tempo reale. Rimane comunque una soluzione efficace per ispezioni visive rapide in ambienti ristretti, dove il budget è un fattore critico.

## 2.6 Altri droni di fascia inferiore

Lo stato dell'arte attuale ci propone moltissime piattaforme, sia di alta gamma come quelle che sono state trattate fin ora, sia altre come:

- **DJI Phantom 4 PRO;**
- **DJI Mavic 2 Enterprise Advanced;**
- **DJI Mini 3 PRO;**

di prezzo molto inferiore e prestazioni nella norma. Questi droni, il cui più costoso sfiora i 6000 €, vengono usati principalmente in ambito amatoriale, inferiori nelle prestazioni ad altre soluzioni ma molto spesso di peso e dimensioni nettamente inferiori, rendendoli una soluzione molto accessibile e maneggevole. Non vengono pensati come soluzioni unicamente per volo in spazi ristretti, quindi non sono dotati di LiDAR ma di altri sensori che permettono ugualmente al drone di percepire lo spazio intorno a se', sebbene con un'accuratezza inferiore.

Caratteristica	Phantom 4 Pro	Mini 3 Pro	Mavic 2 Enterprise Adv.
Peso	1388 g	249 g	909 g
Fotocamera principale	1" CMOS 20 MP	1/1.3" CMOS 48 MP	1/2" CMOS 48 MP + termica
Video	4K @ 60 fps	4K @ 60 fps	4K @ 30 fps
Zoom digitale	no	(x4)	(x32 termica + visivo)
Sensori ostacoli	Frontale, posteriore, laterale	Frontale, posteriore, basso	Omnidirezionali
GPS/GNSS	GPS, GLONASS	GPS, Galileo	GPS, GLONASS, Galileo
Autonomia	Fino a 30 min	Fino a 34 min	Fino a 31 min
Trasmissione video	Lightbridge	OcuSync 3.0	OcuSync 2.0
Funzionalità speciali	Mappatura, rilievi	Ultra-compatto, selfie, VLOS	Termografia, ispezioni, RTK opzionale
Prezzo (indicativo)	1600 €	850 €	6.000 €

Tabella 2.6: Confronto tra DJI Phantom 4 Pro, Mini 3 Pro e Mavic 2 Enterprise Advanced

Nuova popolarità assumono i droni in cui è possibile compiere un'azione di *mix and match*: a una base già performante dotata di sensori di base e protezioni a cui si integra un LiDAR a piacimento, in modo da contenere i costi oppure riutilizzare una piattaforma già posseduta e farne un'upgrade. Un esempio è il **DJI Matrice 300 con TOPODRONE LiDAR AVIA**, che combina una piattaforma da qualche centinaia di dollari con un LiDAR da quasi ventimila: ovviamente non si hanno le stesse performance di droni che utilizzano un unico sistema nativo che lavora di concerto, ma in questo modo invece si può mantenere la base di cui si è già in possesso e aggiornandone solamente i sistemi SLAM.



Figura 2.6: Diji Phantom 4 Pro



Figura 2.7: Diji Mini 3 Pro



Figura 2.8: Diji Mavic 2



Figura 2.9: DIJI Matrice 300 RTK + TOPODRONE LiDAR AVIA

<b>Caratteristica</b>	<b>DJI Matrice 300 RTK</b>	<b>TOPODRONE LiDAR AVIA</b>
Dimensioni	Aperto: 810×670×430 mm Chiuso: 430×420×430 mm	Non specificato
Peso (senza batterie)	Circa 3,6 kg	Non specificato
Peso massimo al decollo	9 kg	Non specificato
Capacità di carico utile	2,7 kg	Circa 1 kg (sensore + GNSS + IMU)
Precisione RTK	Orizzontale: 1 cm + 1 ppm Verticale: 1,5 cm + 1 ppm	Orizzontale: 1 cm Verticale: 1,5 cm
Autonomia di volo	Fino a 55 minuti (senza carico)	Circa 30–35 minuti (con LiDAR montato)
Resistenza al vento	Fino a 15 m/s	Dipende dal drone utilizzato
Altitudine operativa	Fino a 7000 m (con eliche appropriate)	Non specificato
Sistema GNSS	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo	GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo
Temperatura operativa	Da -20°C a 50°C	Da -20°C a 50°C
Grado di protezione	IP45	Non specificato
Tipo di sensore	Compatibile con payload (Zenmuse H20, P1, ecc.)	LiDAR a stato solido con scanner AVIA
Densità di punti	Dipende dal payload	Fino a 300.000 punti/sec
Frequenza di scansione	Dipende dal payload	Fino a 100 Hz
Campo visivo (FOV)	Dipende dal payload	Circa 70°
Software elaborazione	DJI Terra, DJI Pilot	TOPODRONE Post Processing, software GIS compatibili
Applicazioni	Ispezioni, sicurezza, mappatura	Rilievi topografici, 3D, agricoltura, ambiente

Tabella 2.7: Confronto tra DJI Matrice 300 RTK e TOPODRONE LiDAR AVIA

# Capitolo 3

## Fase preliminaria

In questo capitolo vengono presentate le attività preliminari a base di un'attività di volo sperimentale. Per dimostrare la fattibilità della stabilizzazione dell'assetto della posizione di un velivolo pilotato da remoto per applicazioni in ambiente interno, con un budget ridotto, si è agito secondo tale piano:

- Definizione delle specifiche della missione;
- Scelta del velivolo adatto alla missione;
- Scelta dei sensori più consoni;
- Allestimento della piattaforma;
- Attività sperimentale di volo.

### 3.1 Selezione della piattaforma SAPR e dei sensori

La selezione della piattaforma SAPR con cui eseguire la sperimentazione preliminare si è basata principalmente sui seguenti parametri:

- Il velivolo deve essere multi-rotore, di dimensioni contenute (idealmente adatto a volare in tubature di diametro inferiore ai 500mm), ma in grado di essere allestito con i sensori necessari alla sperimentazione;
- I sensori devono essere utili alla stabilizzazione dell'assetto e della posizione del mezzo in volo indoor, oltre a svolgere un lavoro di ostacole avoidance tramite sensori di prossimità per evitare collisioni;
- Scelta dell'autopilota.

Data la natura di questa attività di sperimentazione, si è cercato di stabilizzare il velivolo attraverso sensori quanto più economici possibile ma comunque in grado di garantire delle minime prestazioni in termini di stabilità dell'assetto, della posizione e della capacità di evitare collisioni.

## 3.2 DJI F450 Frame

Il DJI Flame Wheel F450 è un telaio quadricottero modulare, ampiamente utilizzato per applicazioni hobbistiche, ricerca e sviluppo, perchè offre un design robusto e ampio spazio per l'installazione di componenti elettronici, rendendolo ideale per progetti personalizzati. I bracci sono realizzati in PA66 rinforzato con il 30% di fibra di vetro, offrendo una resistenza superiore agli urti, ed essendo di colore rosso e bianco è facilitata la visibilità e l'orientamento in volo; infine il telaio include una piastra PCB integrata ad alta resistenza, che facilita il cablaggio di ESC e batterie. Inoltre i valori PID predefiniti in PX4 e Ardupilot sono generalmente adeguati per un telaio da 450 mm come il F450. Le eliche, i motori, ESC e batteria scelti sono quelli indicati dalla casa produttrice.

### 3.2.1 Caratteristiche Generali

Parametro	Valore
Modello	DJI Flame Wheel F450
Peso del telaio	282 g
Interasse diagonale	450 mm
Peso al decollo consigliato	800–1600 g
Materiale dei bracci	PA66 + 30% fibra di vetro
Colore dei bracci	2 rossi, 2 bianchi

### 3.2.2 Componenti ausiliari adottati

Componente	Specifiche
Motori	920–1000 KV
ESC	30A OPTO
Eliche	8x4.5"
Batteria	LiPo 4S
Controllore di volo	Cube Black +

### Altre Specifiche

Parametro	Valore
Temperatura operativa	-5°C 40°C
Spinta massima per asse	600 g
Carico consigliato per asse	300 g
Fori di montaggio motore	16/19 mm



Figura 3.1: F450 Frame

### 3.3 Cube Black +

Per quanto riguarda il computer di bordo, si è scelto di utilizzare il Pixhawk Cube Black+, un controllore di volo avanzato ad alte prestazioni sviluppato da Hex/ProfiCNC, impiegato in droni e veicoli autonomi e applicazioni professionali. La sua architettura integra sensori, microcontrollori e software real-time per stimare lo stato del veicolo e generare comandi di controllo, mentre il firmware **ArduPilot** sfrutta le sue capacità di calcolo e sensoriali per implementare una struttura di controllo a loop annidati, supportata da un sofisticato algoritmo di stima dello stato, l'Extended Kalman Filter 3 (EKF3).

Il Cube Black+ offre ridondanza e stabilità grazie a:

- **3 IMU;**
- **Interfacce CAN, I2C, UART;**
- **Alimentazione ridondante.**

#### 3.3.1 Architettura dei Controllori in ArduPilot su Cube Black+

L'architettura dei controllori in ArduPilot è progettata per essere modulare, scalabile e indipendente dall'hardware, consentendo l'adattamento a una vasta gamma di veicoli e piattaforme. La struttura si basa su un sistema a più livelli che integra controllori di volo, navigazione, comunicazione e gestione dei parametri:

1. Hardware Abstraction Layer (HAL): fornisce un'interfaccia uniforme per l'accesso all'hardware, e gestisce le porte seriali;
2. AP\_Vehicle: classe base che gestisce l'inizializzazione del veicolo, il caricamento dei parametri e il ciclo di controllo principale e coordina l'esecuzione delle attività e la comunicazione con i sistemi esterni;
3. Controllori di volo.

I controllori di volo, cuore del sistema Ardupilot, si dividono in tre categorie:

- **Loop Interno (Attitude Controller):** controlla rollio, beccheggio e imbardata tramite PID, riceve comandi angolari come input e restituisce come output i comandi di attuazione;
- **Loop di velocità angolare (Rate Controller):** controlla le velocità angolari ed è responsabile della stabilizzazione reattiva;
- **Loop Esterno (Position Controller):** si occupa di navigazione e mantenimento della posizione tramite dati da GPS o altri sensori.

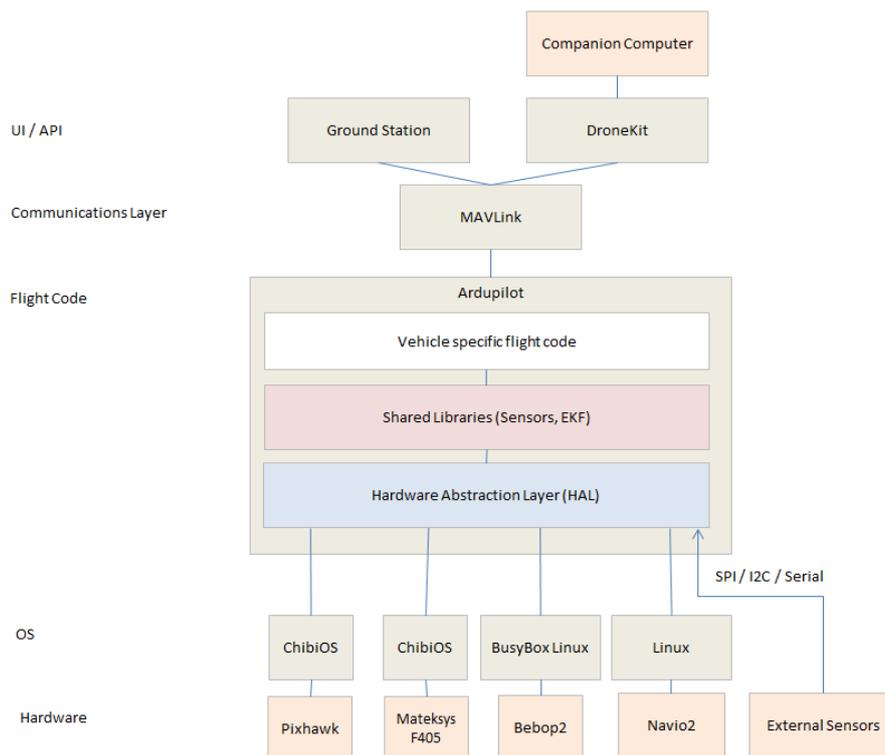


Figura 3.2: Schema dell'architettura di Ardupilot

### 3.3.2 Extended Kalman Filter 3 (EKF3)

EKF3 è il sistema centrale di stima dello stato in ArduPilot, che utilizza i dati ottenuti dai sensori per stimare con alta precisione:

- Posizione  $(x, y, z)$ ;
- Velocità  $(v_x, v_y, v_z)$ ;
- Orientamento (quaternioni);
- Bias dei giroscopi e accelerometri.

Inoltre è un'estensione del Kalman Filter classico, progettata per gestire sistemi non lineari: il principio chiave è l'approssimazione locale lineare tramite la linearizzazione delle funzioni di stato e osservazione.

#### Modello di sistema non lineare

Un sistema dinamico non lineare è descritto da:

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_k &= f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k &= h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k\end{aligned}$$

dove  $f$  e  $h$  sono funzioni non lineari,  $\mathbf{w}$  e  $\mathbf{v}$  sono rumori di processo e misura, assunti gaussiani a media nulla. Per applicare il Kalman Filter, si linearizzano  $f$  e  $h$  attorno allo stato attuale usando le derivate parziali:

$$\begin{aligned}\mathbf{F}_{k-1} &= \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1}} \\ \mathbf{H}_k &= \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}\end{aligned}$$

L'EKF si basa su due fasi iterative:

- **Predizione:** si utilizza il modello del sistema per prevedere lo stato futuro.
- **Correzione:** si utilizza la misura osservata per correggere la previsione.

La chiave dell'EKF è nella stima delle incertezze e nel calcolo della Kalman Gain  $\mathbf{K}_k$ , cioè un fattore di peso che decide quanto fidarsi del modello matematico del sistema (la predizione), oppure delle misure reali (i dati dei sensori): se la misura è molto rumorosa,  $\mathbf{K}_k$  darà più peso al modello, se invece il modello è incerto ma la misura è precisa,  $\mathbf{K}_k$  darà più peso alla misura, ottimizzando continuamente l'equilibrio tra teoria e osservazione.

#### Predizione

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} &= f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) \\ \mathbf{P}_{k|k-1} &= \mathbf{F}_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{F}_{k-1}^\top + \mathbf{Q}\end{aligned}$$

## Aggiornamento

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_k &= \mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \\ \mathbf{S}_k &= \mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^\top + \mathbf{R} \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^\top \mathbf{S}_k^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}_{k|k} &= \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{y}_k \\ \mathbf{P}_{k|k} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \end{aligned}$$

### 3.3.3 Controllori per Obstacle Avoidance in ArduPilot

Una delle funzionalità più complesse di Ardupilot è l'**obstacle avoidance**, ovvero l'evitamento attivo degli ostacoli durante la navigazione autonoma, indispensabile per le applicazioni di cui stiamo trattando, che si basa su diversi sottosistemi software interconnessi e sull'integrazione con sensori di prossimità.

#### Architettura Generale dell'Obstacle Avoidance

ArduPilot implementa l'obstacle avoidance attraverso una combinazione di:

- **Sensori** come LiDAR, sonar, radar;
- **Middleware**, cioè moduli software che raccolgono i dati dei sensori e li trasformano in rappresentazioni spaziali;
- **Planner**, sottosistemi per la pianificazione del movimento;
- **Controller**, moduli che generano i comandi di attuazione per evitare gli ostacoli.

Il modulo **AP\_ObstacleAvoidance** gestisce l'attivazione e il comportamento dell'obstacle avoidance. I parametri principali sono:

- **AVOID\_ENABLE**: attiva/disattiva il modulo.
- **AVOID\_TYPE**: specifica il tipo di algoritmo usato.

**Bendy Ruler**, per esempio, è un algoritmo di *path planning* reattivo sviluppato da ArduPilot che funziona in combinazione con una mappa polarizzata dei dati dei sensori, selezionando angoli di deviazione ottimali basati su un compromesso tra l'obiettivo da raggiungere e la sicurezza del multirobot utilizzato. L'algoritmo lavora come segue:

1. Costruzione di una **polar histogram** dai dati del sensore;
2. Valutazione dei settori liberi rispetto all'angolo desiderato;
3. Selezione del percorso ottimale considerando la curvatura (Bendy).

```

1 Vector3f BendyRuler::get_avoidance_vector() {
2     float obstacle_angle = get_best_direction();
3     Vector3f avoidance_vector = convert_angle_to_vector(
4         obstacle_angle);
5     return avoidance_vector;
}

```

Listing 3.1: Estratto semplificato da `AP_BendyRuler.cpp`

La logica di controllo dell'obstacle avoidance dunque non risiede in controllori PID classici, ma in un sistema decisionale basato su regole e modifiche di traiettoria, detto controllo cinematico.

### Controllo Cinematico

I comandi generati dal planner vengono trasformati in velocità desiderate. Il controller di velocità `PosControl` si occupa di:

- Calcolo della velocità target;
- Generazione dei comandi di attuazione (pitch, roll, yaw rate, throttle);
- Integrazione con il modulo `AP_NavEKF` per la stima dello stato.

In caso di ostacolo critico, l'algoritmo può fermare il veicolo (brake), ed eventualmente innescare una modalità di fallback con hovering o ritorno automatico (RTL).

### 3.3.4 Modalità di volo utilizzate per ostacole avoidance

La maggior parte delle tante modalità di volo che offre Ardupilot non sono fruibili senza la presenza del GPS, per cui vengono dedicate modalità proprio al volo indoor, tra cui LOITER e ALTHOLD.

#### Modalità di volo LOITER

`AP_Proximity` raccoglie i dati grezzi dei sensori e li organizza in 8 settori da 45 gradi, costruendo una recinzione virtuale 2D per delimitare lo spazio sicuro. `AC_Avoidance` modifica i comandi del controllore `Loiter` per accorciare i vettori di velocità e prevenire collisioni. Quando i messaggi provenienti dai sensori di distanza non vengono ricevuti per tutti gli 8 settori, i settori adiacenti a quelli vuoti forniscono i propri dati per riempire i settori mancanti: questo porta convenientemente alla creazione di una mini fence barrier, che ha maggiori probabilità di proteggere il veicolo dall'impatto con l'ostacolo.

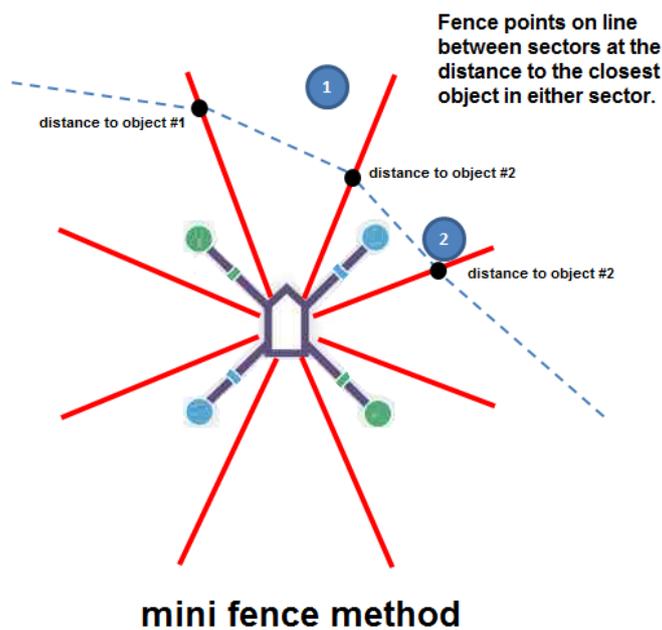


Figura 3.3: Funzionamento in Loiter

### Modalità di volo AltHold

Non potendo questa modalità stimare le velocità, le distanze sono convertite in angoli pitch/roll di repulsione dagli ostacoli, combinati con l'input del pilota. Il sistema di obstacle avoidance in ArduPilot rappresenta dunque una soluzione robusta e modulare che combina pianificazione, controllo e sensing: sebbene non si tratti di controllori classici, la logica di avoidance è strettamente legata alla generazione di comandi di controllo in tempo reale per assicurare la sicurezza e l'autonomia della missione.

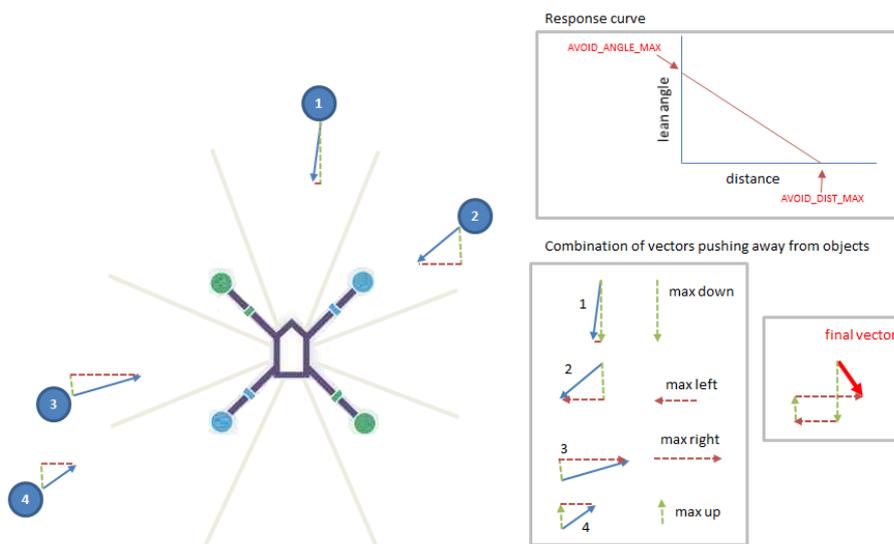


Figura 3.4: Funzionamento in AltHold

## 3.4 Scelta dei sensori

La stabilizzazione del volo in assenza del segnale GPS e in presenza di ostacoli è affidata ai seguenti sensori:

1. LiDAR;
2. Sensore ottico;
3. Sensori di prossimità.

I sensori scelti sono compatibili con l'ambiente Pixhawk e attraverso un algoritmo di data-fusion è possibile integrare i dati acquisiti da ciascun sensore e pilotare in sicurezza il SAPR all'interno, con diverse modalità di funzionamento del mezzo stesso.

### 3.4.1 Sensore LiDAR Benewake TFmini-S

Il **Benewake TFmini-S** è un sensore LiDAR a punto singolo basato sulla tecnologia Time-of-Flight (ToF), progettato per applicazioni che richiedono misurazioni precise delle distanze in un formato compatto e leggero e a basso consumo energetico, con un costo contenuto (circa 50 \$): tutte queste caratteristiche lo rendono il candidato ideale per questo progetto.



Figura 3.5: Sensore LiDAR Benewake TFmini-S

## Specifiche Tecniche

Parametro	Valore
Intervallo di misura	0.1 – 12 m (@90% riflettività)
Accuratezza	$\pm 6$ cm (0.1–6 m), $\pm 1\%$ (6–12 m)
Risoluzione distanza	1 cm
Frequenza di campionamento	Fino a 1000 Hz
Angolo di campo visivo (FOV)	2°
Immunità alla luce ambientale	Fino a 70 kLux
Sorgente luminosa	VCSEL (850 nm)
Sicurezza fotobiologica	Classe 1 (EN 60825)
Interfacce di comunicazione	UART (115200 baud), I <sup>2</sup> C (fino a 400 kbps)
Tensione di alimentazione	5 V $\pm$ 0.1 V
Consumo medio di corrente	<140 mA
Consumo massimo di corrente	200 mA
Consumo energetico	<0.7 W
Dimensioni	42 × 15 × 16 mm
Peso	5 g $\pm$ 0.3 g
Temperatura di esercizio	0°C – 60°C
Temperatura di stoccaggio	-20°C – 75°C
Materiale del case	PC/ABS
Lunghezza del cavo	10 cm

Tabella 3.1: Specifiche tecniche del TF-mini S

### 3.4.2 HereFlow Optical Flow sensor

L' **HereFlow** è un sensore di navigazione miniaturizzato per UAV che integra un sensore di flusso ottico PMW3901, un LiDAR a tempo di volo (ToF) e un'unità di misura inerziale (IMU) a 6 gradi di libertà. Grazie alle sue dimensioni ridotte (28,8 mm × 9,5 mm) e al peso contenuto (circa 1 grammo), è facilmente integrabile in una varietà di piattaforme. Il sensore utilizza il protocollo CAN per una comunicazione affidabile e supporta sistemi come ArduPilot e PX4. Per lo scopo della sperimentazione non è stato utilizzato il modulo LiDAR messo a disposizione dal sensore, preferendo affidarsi al sensore LiDAR scelto in precedenza.

#### Specifiche Tecniche

<b>Parametro</b>	<b>Valore</b>
Dimensioni	28,8 mm × 9,5 mm
Peso	circa 1 g
Interfaccia di comunicazione	CAN
Alimentazione	5 V
Temperatura operativa	-20°C – +70°C
<b>Sensore di Flusso Ottico (PMW3901)</b>	
Campo di misura	80 mm
Campo visivo (FOV)	42°
Velocità massima di movimento	7,4 rad/s
Illuminazione minima	> 60 lux
Lunghezza d'onda LED IR	940 nm (Classe 1)
<b>LiDAR ToF Integrato</b>	
Frequenza di aggiornamento	fino a 50 Hz
Campo visivo (FOV)	27°
Distanza operativa	Fino a 2 m
Accuratezza	±3%
Tecnologia	ST FlightSense™

Tabella 3.2: Specifiche tecniche dell'Optical Flow Here Flow

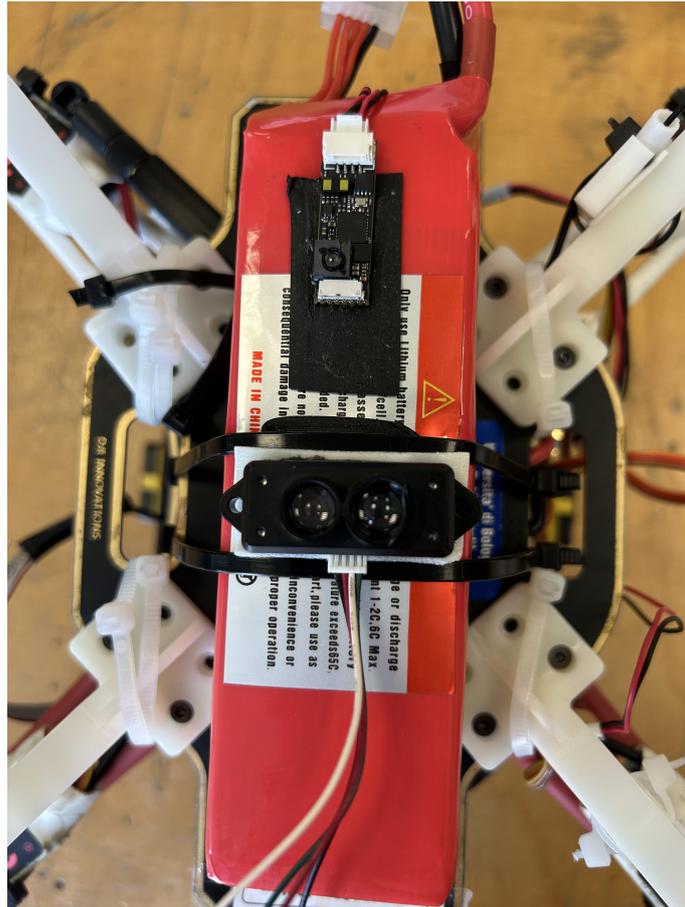


Figura 3.6: Set up dei sensori Optical Flow e LiDAR sul drone

Il sensore è stato installato sulla parte inferiore del drone, con la lente verso il basso e con il proprio asse Y allineato a quello della piattaforma, vicino al sensore LiDAR, installato in maniera simile. Particolare cura ha richiesto la calibrazione, eseguita più volte su superfici con marker per assicurare il corretto funzionamento del drone.

### 3.4.3 Teraranger Evo Tower

La **TeraRanger Evo Tower** è un sistema di rilevamento a distanza basato sulla tecnologia Time-of-Flight (ToF), sviluppato per fornire una scansione rapida e continua dell'ambiente circostante a 360 gradi, adottando una configurazione *solid-state*, cioè senza parti in movimento, garantendo robustezza maggiore rispetto a modelli analoghi con parti rotanti.

La Tower è composta da 8 moduli TeraRanger Evo disposti radialmente, e ciascun opera come un sensore ToF indipendente, emettendo impulsi di luce infrarossa e misurando il tempo impiegato dalla luce per raggiungere un oggetto e tornare indietro: questo principio consente di ottenere misurazioni affidabili senza dipendere dalle condizioni di illuminazione ambientale.

I sensori della Tower presentano un campo visivo molto stretto (circa  $2^\circ$  per ciascun sensore), quindi per permettere una copertura completa attorno al sistema si è scelta una disposizione angolare di circa  $45^\circ$  tra un sensore e il suo successivo; inoltre ogni sensore aggiorna le misure con frequenze molto elevate rendendo il sistema adatto al controllo in tempo reale e alla gestione dinamica dell'evitamento ostacoli. Il controller centrale integrato nella Tower raccoglie i dati simultaneamente da ciascun modulo, sincronizza le letture e le trasmette tramite interfaccia UART al Cube Black +; la presenza poi di una IMU integrata (Bosch BNO055) consente di acquisire dati di assetto e compensare eventuali oscillazioni o rotazioni del veicolo, migliorandone così la stabilità. In sintesi, il TeraRanger Evo Tower rappresenta una soluzione leggera, compatta e altamente reattiva per applicazioni di obstacle avoidance, navigazione autonoma e mappatura, con un'architettura semplice e di prezzo contenuto (circa 600 dollari).

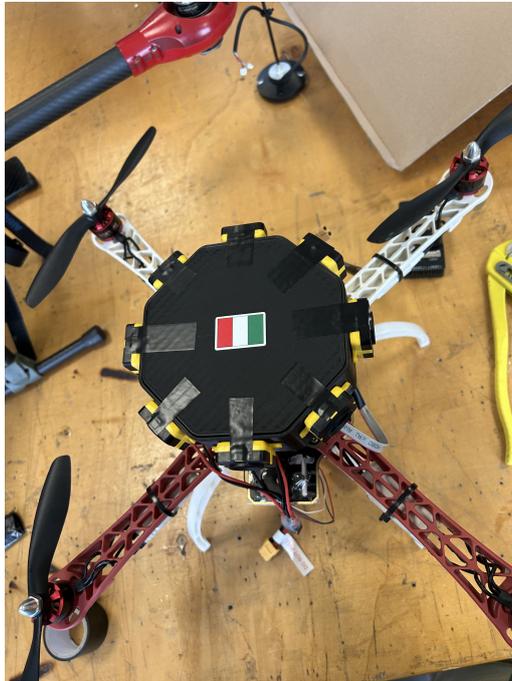


Figura 3.7: Installazione Tower sul frame

## Specifiche Tecniche

Caratteristica	Specifiche
Tipo di sensore	LiDAR solid-state
Configurazioni disponibili	4 o 8 sensori
Gamma operativa	Da 0,5 m a 60 m
Frequenza di aggiornamento	Fino a 240 Hz (4 sensori), 120 Hz (8 sensori)
Precisione	$\pm 4$ cm (fino a 14 m), $\pm 1,5\%$ (oltre 14 m)
Risoluzione	0,5 cm (fino a 14 m), 2 cm (oltre 14 m)
Campo visivo per sensore	Circa $2^\circ$
Angolo tra i sensori	$45^\circ$
Dimensioni	Diametro 120 mm, Altezza 42 mm
Peso	92 g (4 sensori), 135 g (8 sensori)
Alimentazione	12 – 24 V DC
Corrente assorbita	Fino a 1100 mA @ 12 V (8 sensori)
Interfacce disponibili	USB 2.0 Micro-B, UART 3,3 V @ 115200 baud
LED integrati	WS2812B RGB
IMU integrata	Bosch BNO055
Compatibilità	Pixhawk, ROS, Arduino, Raspberry Pi
Applicazioni	Obstacle Avoidance, SLAM, mappatura, navigazione autonoma
Conformità sicurezza	IEC 62471 (Eye-safe)

Tabella 3.3: Specifiche tecniche del TeraRanger Evo Tower

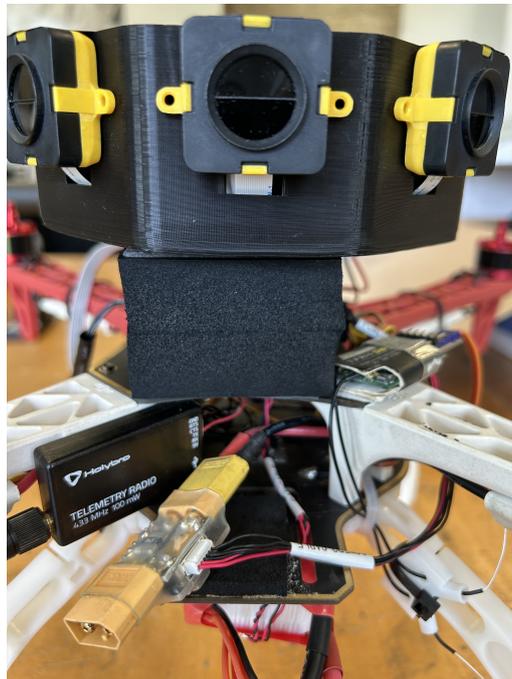


Figura 3.8: Dettaglio sensore e modalità di stabilizzazione della tower

## 3.5 Allestimento, calibrazioni e conclusioni

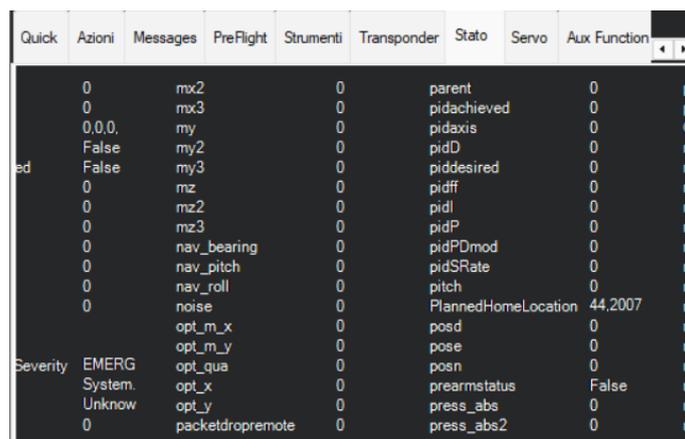
Dopo aver scelto accuratamente i sensori più adatti all'esperienza, si è proceduto all'installazione fisica sul drone e in seguito alla calibrazione, una parte delicata e difficoltosa, che ha portato a svariate problematiche più o meno complesse, la cui risoluzione è stata cruciale per il corretto funzionamento del drone al pieno delle sue funzionalità: elenchiamo brevemente gli errori più ricorrenti e la loro soluzione.

### 3.5.1 Cube Black +

Nonostante sia un ottimo autopilota con una pregevole potenza a disposizione, l'ensemble dei sensori in funzionamento coordinato ha provocato una saturazione della RAM e un'impossibilità di collegamento con il software Mission Planner, sia via MAVlink, sia tramite telemetria. Per ovviare a ciò si è provato, dopo una fase di approfondita ricerca e studio del parametro incriminato **STAT\_RUNTIME**, a ricorrere al programma alternativo QGroundControl, più indicato per l'ambiente PIX4 ma ugualmente efficace, tramite il quale si è riuscito ad aumentare la disponibilità del Cube, per poi in seguito procedere all'archiviazione dei log di volo accumulati nei vari tentativi di volo o di calibrazione. Pertanto, per permettere all'autopilota di agire nelle condizioni migliori possibili in una condizione ad alta richiesta, è bene mantenere la memoria più snella possibile ed evitare l'accumulo di informazioni.

### 3.5.2 Optical Flow

Sicuramente la maggior complessità di calibrazione è legata all'optical flow, che ha portato a una serie di malfunzionamenti: quando il sensore è operativo, si dovrebbe presentare una condizione per cui i parametri **opt\_m\_x**, **opt\_m\_y** and **opt\_qua** dovrebbero essere non nulli.



	Quick	Azioni	Messages	PreFlight	Strumenti	Transponder	Stato	Servo	Aux Function
	0		mx2	0			parent	0	
	0		mx3	0			pidachieved	0	
	0,0,0,		my	0			pidaxis	0	
	False		my2	0			pidD	0	
ed	False		my3	0			piddesired	0	
	0		mz	0			pidff	0	
	0		mz2	0			pidl	0	
	0		mz3	0			pidP	0	
	0		nav_bearing	0			pidPDmod	0	
	0		nav_pitch	0			pidSRate	0	
	0		nav_roll	0			pitch	0	
	0		noise	0			PlannedHomeLocation	44,2007	
			opt_m_x	0			posd	0	
			opt_m_y	0			pose	0	
Severity	EMERG		opt_qua	0			posn	0	
	System.		opt_x	0			prearmstatus	False	
	Unknow		opt_y	0			press_abs	0	
	0		packetdropremote	0			press_abs2	0	

Figura 3.9: Condizione di malfunzionamento dell'Optical Flow

Dopo numerose consultazioni della guide e forum messi a disposizione da Ardupilot si è provato a sostituire il Cube Black + con un modello precedente, il Cube Black, con ottimi risultati, specialmente nell'esclusione di problematiche legate all'hardware dell'Here Flow: una buona soluzione, ma solo temporaneamente,

considerato che il modello di autopilota a disposizione non era sufficientemente potente per coordinare l'ensemble di sensori.

L'unica opzione per dare una risposta definitiva è stata, a malincuore, un *wipe-out* dell'autopilota in dotazione, per contrastare pre-esistenti sovrascritture di parametri: una mossa efficace ma a grande dispendio di tempo, dal momento che si è dovuto ricominciare con la fase di installazione e calibrazione dall'inizio.

### 3.5.3 LiDAR Benewake TFmini-S

Il sensore LiDar è di semplice installazione e configurazione: per quest'ultima si è optato la connessione UART, a scapito dell' I2C, più esigente in termini di risorse computazionali: l'unica sfida è stata puramente di hardware, in quanto la ground line del cavetto di connessione era danneggiata in maniera percettibile solamente da un voltmetro. Una volta posto rimedio alla saldatura deteriorata, il LiDAR ha funzionato correttamente e in maniera apprezzabile.

### 3.5.4 Teraranger Evo Tower

La Tower a 8 sensori è stata installata tramite cuscinetti in spugna per permetterne la rimozione e il facile accesso all'autopilota, ma comunque permettendo una certa stabilità. Essendo però un dispositivo ad alta richiesta energetica, la sola alimentazione tramite cavo MAVlink non è sufficiente, è necessario che sia la batteria a sostenerlo: in caso contrario, appaiono una serie di errori relativi alla mancata ricezione di informazioni. Per la calibrazione della torre si utilizza una funzione molto valida di Mission Planner, chiamata **proximity**, che mostra in un display tipo radar le distanze agli ostacoli suddivise in settori.

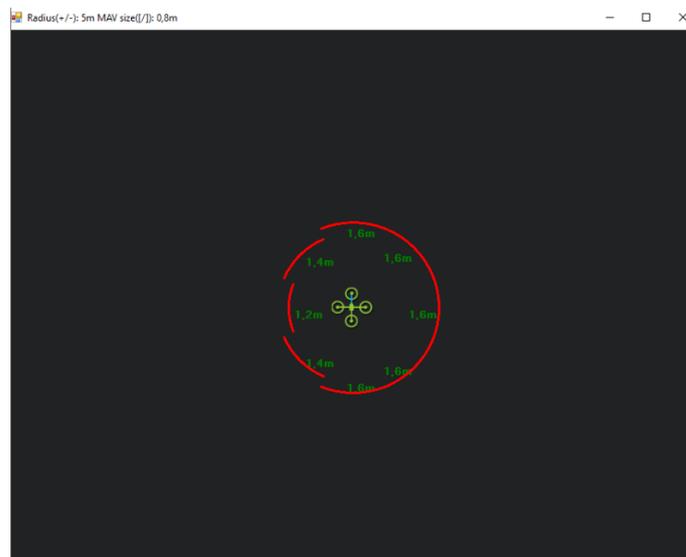


Figura 3.10: Esempio di Proximity su Mission Planner

Durante la calibrazione, si è notato che tra la rosa di otto sensori, i due posteriori nel lato sinistro funzionano in maniera leggermente peggiore degli altri, portando a

tratti a una sorta di angolo cieco, che però non ha influito sulla qualità complessiva dell'esperimento.



Figura 3.11: Postazione di calibrazione della Tower

### 3.5.5 Considerazioni finali sulla fase di calibrazione

Sebbene sia la fase più complessa di tutto l'esperimento, è indubbiamente fondamentale alla buona riuscita di esso ed è strettamente legata alla pregevolezza dei dati ottenuti: ne consegue quindi l'indispensabilità e la necessità di lavoro certosino. Le sfide che le operazioni fisiche sull'hardware portano con sé sono estremamente stuzzicanti, imprevedibili, a tratti anche molto frustranti, soprattutto quando si deve tornare più e più volte sui propri passi mettendosi continuamente in discussione. Tra i sensori scelti senza dubbio quello di più facile manipolazione è il LiDAR, decisamente *straight-forward*, mentre l'optical flow ha richiesto svariati mesi di tentativi di *debugging* culminati in un *wipe-out* dell'autopilota, ma anche di tanta conoscenza accumulata nel processo. Menzione d'onore ai componenti meno delicati ma ugualmente importanti degli ESCs, il cui tuning è stato molto complesso e ha richiesto l'intervento di svariati collaboratori del laboratorio di meccanica del volo, di grandissima competenza, per riuscire a farli agire correttamente.

# Capitolo 4

## Fase di volo

Nel seguente capitolo si discute la fase culmine dell'esperimento, durante la quale la piattaforma è stata testata nella struttura del CIRI-AEROSPACE. L'esperimento si è svolto nell'arco di più giorni, per permettere di apportare le eventuali modifiche e accorgimenti, ma analizziamo solamente i dati qualitativamente più rilevanti.

### 4.1 Allestimento dell'area predisposta al volo

Per la scelta di un'area adatta al volo indoor si è optato per una stanza dalle dimensioni adatte a simulare uno spazio relativamente ristretto, anche se non un vero e proprio cunicolo, il cui controllo sarebbe stato troppo complesso, dal momento che la piattaforma non è dotata di telecamere con cui garantire la visibilità del pilota.

Il *main goal* della prova consiste nel replicare un volo con una piattaforma il più economico possibile, nelle condizioni sfavorevoli in cui dovrebbe essere necessaria questa tecnologia, come spazi angusti, scarsa visibilità, presenza di polveri e detriti: di questo scenario sono state ricreate la presenza di ostacoli, necessari per testare la capacità di *obstacle avoidance*, e il sezionamento dello spazio disponibile per garantire un ridotto spazio di manovra. L'eccessiva luminosità della stanza, purtroppo, ha reso difficoltoso l'utilizzo dell'optical flow, in difetto della capacità di assimilare informazioni dalla pavimentazione, resa lucente dai raggi solari: per ovviare a questa sgradevole situazione, sono stati applicati dei marker di contrasto.

L'utilizzo dei marker ha permesso il corretto funzionamento dell'optical flow e di ben delineare i confini dell'esperimento; infatti è emerso dai primi test di volo che ogni qualvolta il drone usciva dalla zona delimitata dai marker, il pilota ne perdeva parzialmente o completamente il controllo. Il sensore optical flow, che si basa sull'analisi del movimento apparente dei pixel in sequenze di immagini catturate da una telecamera puntata verso il suolo e per cui il movimento della texture tra due frame consecutivi permette di stimare lo spostamento laterale del drone rispetto al terreno, perdeva i propri riferimenti, andando incontro a degradamento delle prestazioni e altre problematiche:

- I pixel risultano troppo simili ovunque, quindi il vettore di spostamento non può essere calcolato con precisione;

- Il sensore restituisce spostamenti nulli o casuali, facendo credere al sistema che il drone sia fermo, anche se si sta effettivamente muovendo;
- Incremento del rumore e corruzione dei dati.



Figura 4.1: Allestimento con ostacoli e markers

## 4.2 Svolgimento dell'esperimento

Dopo aver messo in sicurezza la zona, vengono svolti gli ultimi step di approntamento:

- Regolazione dei comandi di volo per meglio adattarsi alle richieste del pilota sulla radio **Futaba T18mz**,
- Montaggio eliche sul drone, che di norma, per motivi di sicurezza, vengono rimosse, in senso orario sui bracci 2 e 4, e antiorario su 1 e 3;
- Calibrazione del *compass*.



Figura 4.2: Radio Futaba T18MZ e drone con eliche

In seguito, dopo alcuni voli in modalità STABILIZE di prova, si è scelto di utilizzare entrambe le modalità di volo che supportano il volo indoor, LOITER e ALTHOLD, con il focus sulla capacità di obstacle avoidance, avvicinando il drone agli ostacoli presenti e accuratamente allestiti.

### 4.3 Volò in ALTHOLD

AltHold (Altitude Hold Mode), come abbiamo discusso prima, è una modalità di volo in cui il multirottore mantiene automaticamente una quota costante usando i sensori di altitudine, in questo caso il LiDAR.

Il pilota controlla solo rollio, beccheggio e imbardata, mentre la manetta, **throttle**, è gestita in modo particolare:

- Quando lo stick è in posizione centrale (tipicamente 50%), il drone mantiene la quota;
- Se aumenta la manetta, il drone sale a velocità proporzionale allo scostamento.
- Se lo stick viene abbassato, il drone scende.

In sintesi non si controlla più la spinta erogata, ma il pilota fornisce solamente comandi di salita o discesa verticale.

Nell'analisi dei dati di volo si è prestata particolare attenzione alla buona riuscita dell'obstacle avoidance, quindi, dopo aver controllato la coerenza dei risultati, si è deciso di restituire le conclusioni raggiunte con un occhio di riguardo a ciò.

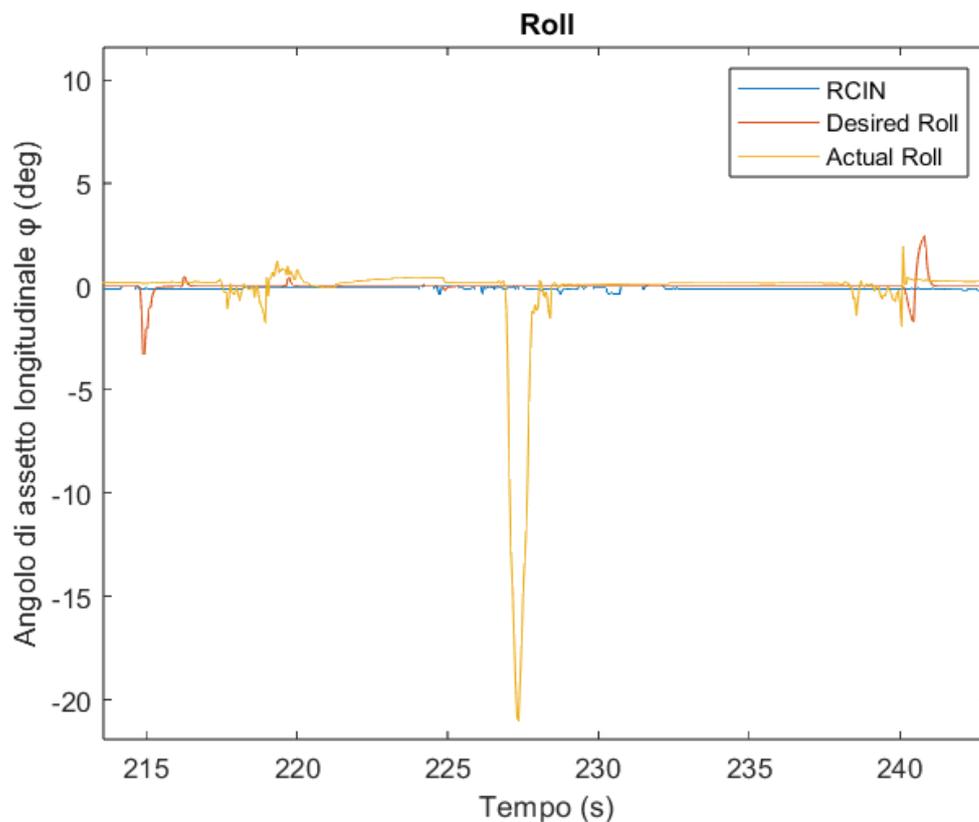


Figura 4.3: Dettaglio Avoidance in Rollio

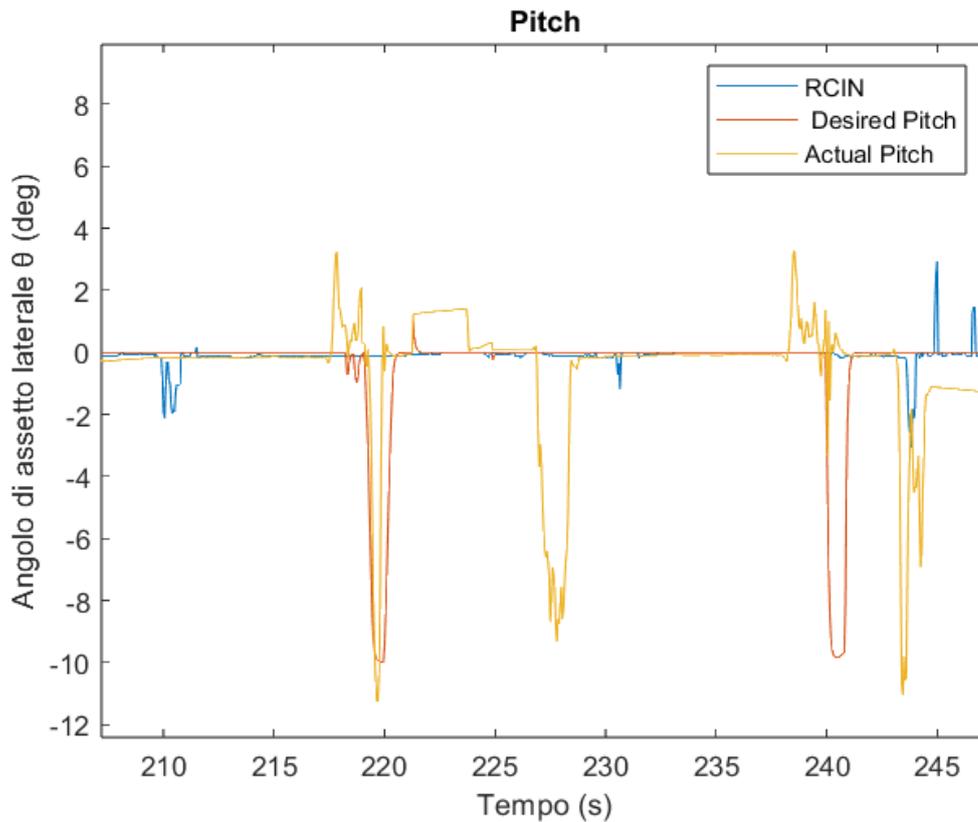


Figura 4.4: Dettaglio Avoidance in Beccheggio

Come appena mostrato, durante la fase di obstacle avoidance il controllore genera manovre repentine sia in rollio che in beccheggio, necessarie per deviare rapidamente la traiettoria ed evitare potenziali collisioni.

Nel grafico relativo al rollio si osservano due picchi rilevanti: in tali istanti, il valore del rollio desiderato (in rosso) subisce variazioni repentine, raggiungendo valori fino a  $-18$ . Il valore effettivo di rollio Actual Roll (giallo) segue l'andamento richiesto, con uno scostamento massimo di circa 2, compatibile con i tempi di risposta del controllore e la dinamica dell'attuatore. La traccia RCIN (blu) mostra l'input utente, che risulta pressoché nullo: l'avoidance è quindi completamente automatica. Anche nel caso del beccheggio si riscontrano manovre evidenti tra i secondi 220 e 245. Il Desired Pitch presenta grandi variazioni seguite da reazioni altrettanto rapide del drone. Il tracciato dell'Actual Pitch conferma che il drone è in grado di seguire con buona fedeltà il riferimento desiderato, pur in presenza di disturbi o incertezze legate alla dinamica del volo ravvicinato agli ostacoli.

Complessivamente, l'analisi evidenzia un corretto funzionamento del modulo di obstacle avoidance: il sistema genera manovre coerenti con l'ambiente circostante e le esegue in tempi compatibili con una navigazione sicura. L'errore tra comando desiderato e risposta reale rimane entro limiti accettabili, il che testimonia l'affidabilità del controllo anche in scenari complessi.

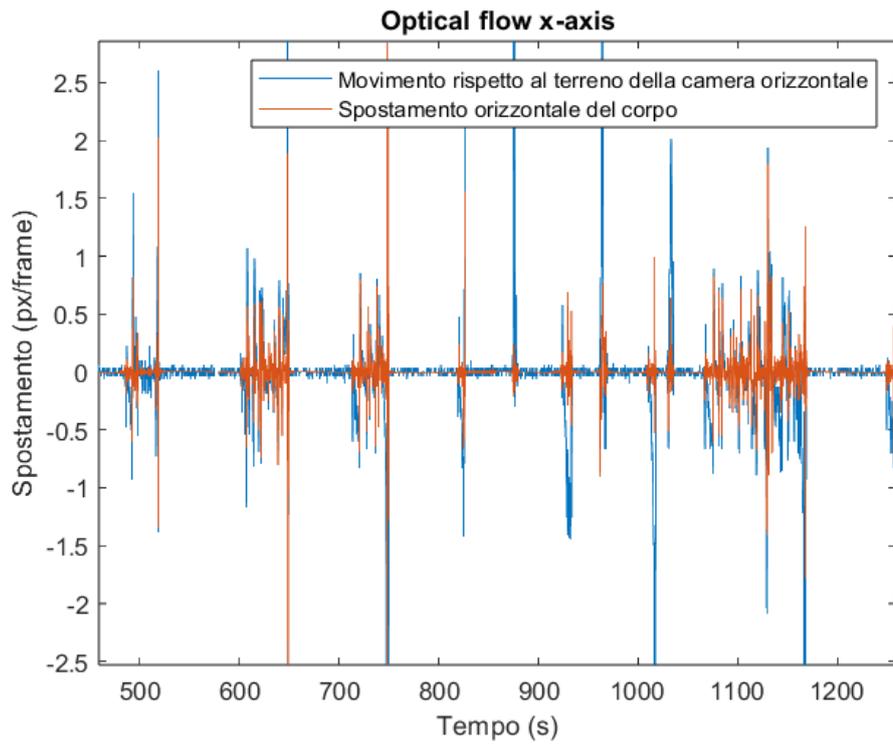


Figura 4.5: Funzionamento dell'optical flow sulle ascisse

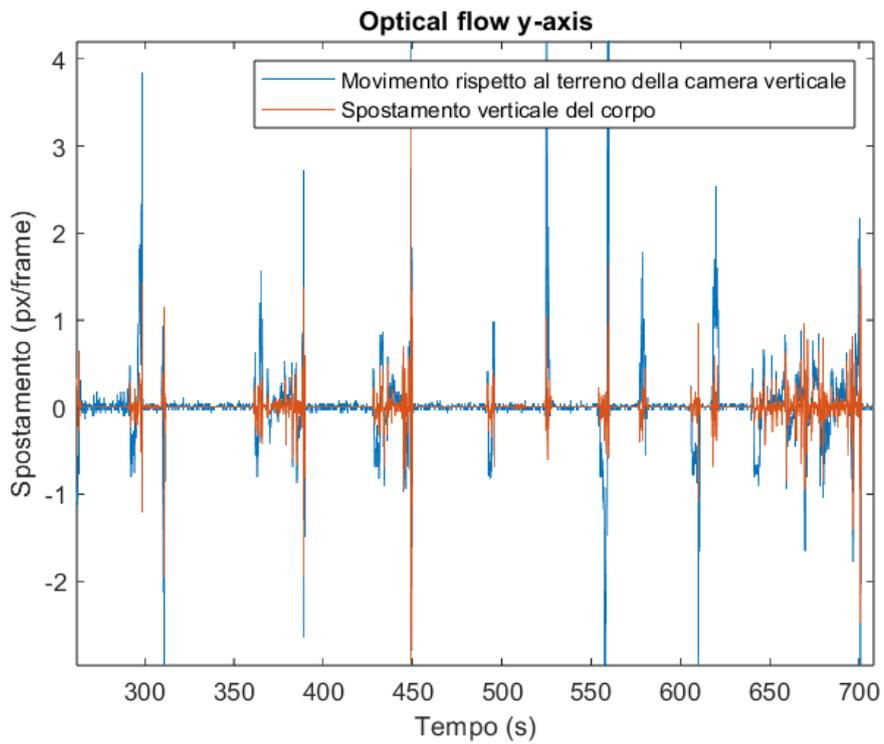


Figura 4.6: Funzionamento dell'optical flow sulle ordinate

Le figure sopra mostrano l'andamento dell'optical flow rilevato dal sensore lungo le due direzioni principali dell'immagine (x-axis e y-axis), confrontato con lo spostamento stimato del corpo del drone lungo gli assi corrispondenti nel sistema corpo. Nel primo grafico si osserva il comportamento dell'optical flow sull'asse orizzontale dell'immagine, che corrisponde al movimento laterale del drone rispetto al terreno. Il tracciato blu rappresenta il movimento apparente dei pixel espresso in pixel/frame, mentre la curva arancione mostra lo spostamento orizzontale del corpo calcolato dal sistema di navigazione. I due segnali risultano complessivamente coerenti, con ampiezze simili e andamenti compatibili, sebbene in alcuni intervalli si notino disallineamenti dovuti a rumore, drift o a condizioni di superficie poco contrastata, dati dall'eccessiva luminosità della stanza.

Il secondo grafico propone un confronto simile, in cui la traccia dell'optical flow (blu) e quella dello spostamento stimato dal corpo (arancione) mostrano buona coerenza, con picchi e variazioni che coincidono nei momenti di maggiore dinamismo dovuti all'obstacle avoidance. L'analisi dei due grafici conferma dunque il buon funzionamento dell'optical flow anche nella modalità non troppo accurata dell'ALTHOLD.

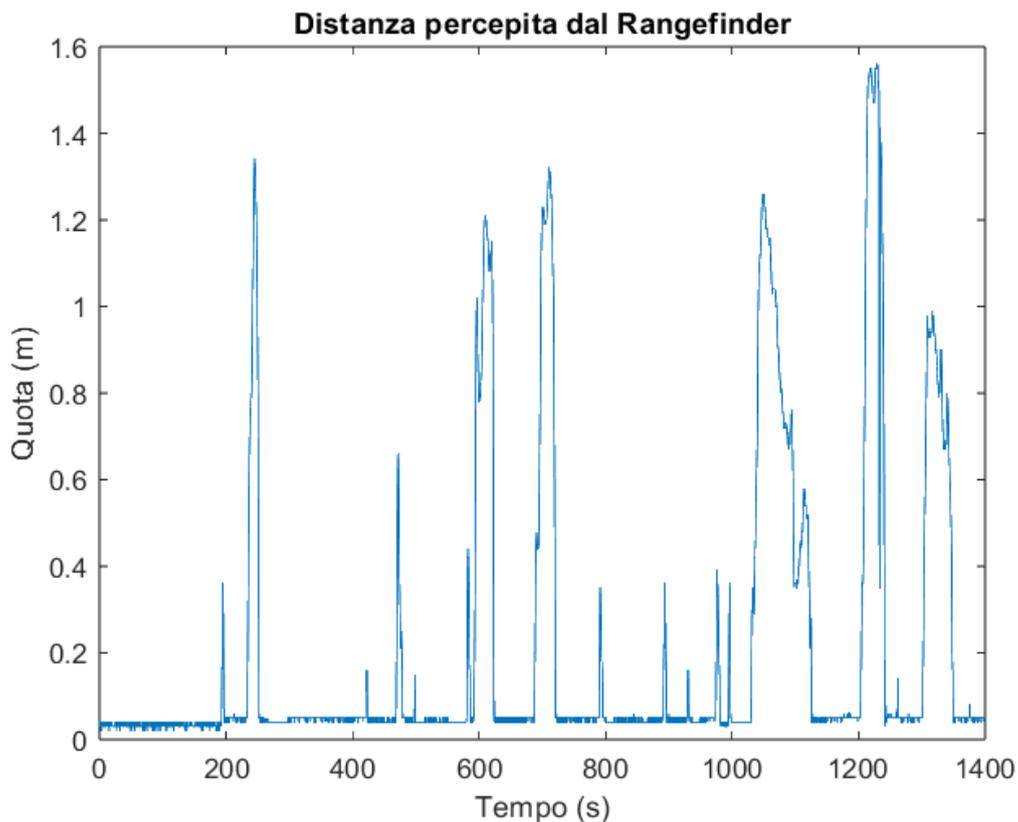


Figura 4.7: Distanza dal suolo rilevata dal LiDAR

Nell'ultima immagine che viene proposta riguardo all'ALTHOLD, vediamo i dati relativi al LiDAR, che risultano di scarsa qualità, per una serie di motivazioni: in questa modalità il drone non ha stabilizzazione orizzontale automatica, e questo porta a oscillazioni, beccheggi e rollii più marcati, essendo anche più difficile per il

pilota controllare la piattaforma avendo la manetta vincolata all'ascensione verticale. Il rangefinder lavora meglio quando il drone è stabile e perpendicolare al suolo: se vi è troppa inclinazione o movimento brusco i raggi del rangefinder non colpiscono correttamente il terreno, generando dati instabili, con salti o rumore.

### **4.3.1 Conclusioni sulla prova di volo in ALTHOLD**

Per tirarne le somme, la sperimentazione condotta in modalità ALTHOLD ha confermato il pieno conseguimento degli obiettivi predefiniti, attestando la capacità della piattaforma di mantenere una quota costante in ambienti indoor e di gestire in modo efficace l'evitamento di ostacoli lungo il tragitto. L'esclusione dei dati relativi all'imbardata è stata deliberata, in quanto tali informazioni presentano una rilevanza marginale rispetto alle finalità specifiche dell'esperimento: l'analisi si è pertanto concentrata sulle componenti di beccheggio e rollio, che forniscono una descrizione più significativa del comportamento dinamico del sistema. I risultati evidenziano una risposta stabile e controllata, associata a una buona manovrabilità, elementi che concorrono a dimostrare la robustezza dell'architettura di controllo e l'affidabilità operativa del sistema nel portare a termine la missione senza incorrere in errori o malfunzionamenti.

## 4.4 Prova di volo in Loiter

Loiter è una modalità di volo in cui il drone mantiene automaticamente posizione e altitudine in assenza di GPS, grazie al lavoro di concerto di:

- **Optical Flow**;
- **Rangefinder**, LiDAR in questo caso;
- **EKF (Extended Kalman Filter)**, che fonde i sensori per stimare la posizione.

Anche in questo caso si è prestata particolare attenzione all'obstacle avoidance, e vengono riportati i dati relativi a Optical Flow, LiDAR e comandi di volo.

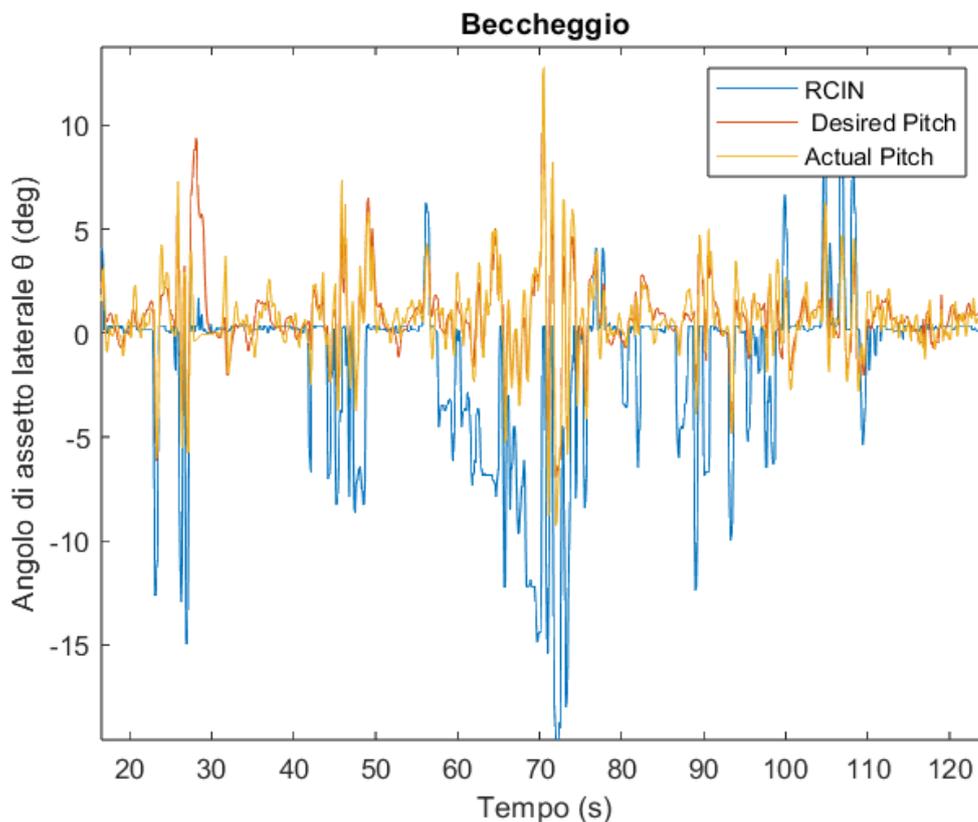


Figura 4.8: Dettaglio Obstacle Avoidance in Beccheggio

L'asse delle ascisse rappresenta il tempo in secondi, mentre l'ordinata riporta il valore dell'angolo di assetto in gradi. Sono tracciate tre curve:

- Desired Pitch (Beccheggio desiderato);
- Actual Pitch (Beccheggio effettivo);
- RCIN Pitch (Radiocomando in ingresso).

Osserviamo una continua oscillazione tra comando desiderato e risposta reale, con scarti anche di 10–12 gradi: questo comportamento è tipico di una fase in cui il drone evita ostacoli eseguendo rapide correzioni per mantenere la traiettoria, e il controllo sul beccheggio appare abbastanza reattivo, ma non perfettamente allineato: ci sono momenti in cui il drone fatica a seguire il comando, probabilmente a causa di disturbi ambientali dati dalla presenza di eccessiva luce nella stanza. Il profilo RCIN indica che l'operatore non stava pilotando attivamente il pitch, poichè risulta molto spesso costante o assente, mostrando che l'azione è completamente gestita in autonomia dal controllore.

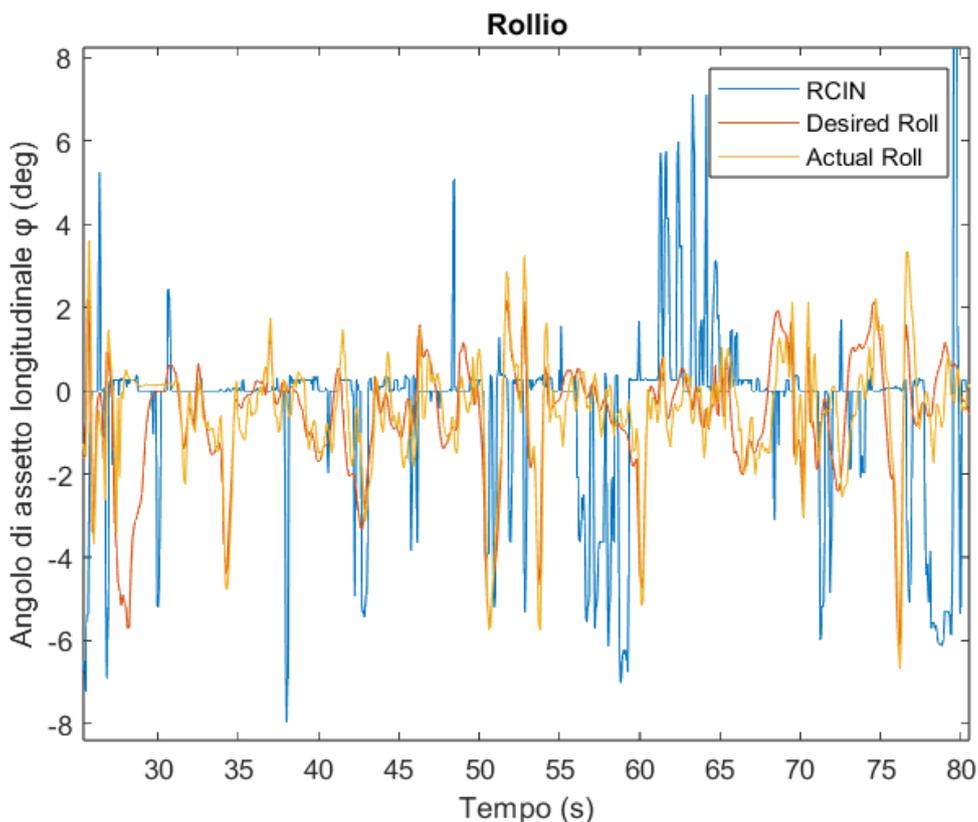


Figura 4.9: Dettaglio Obstacle Avoidance in Rollio

L'asse delle ascisse anche in questo caso rappresenta il tempo in secondi, mentre l'ordinata riporta il valore dell'angolo di assetto longitudinale in gradi. Sono tracciate tre curve:

- Desired Roll (Rollio desiderato);
- Actual Roll (Rollio effettivo);
- RCIN Roll (Radiocomando in ingresso).

Il comportamento è più instabile rispetto al pitch, specialmente tra i secondi 60 e 67 circa: ci sono picchi improvvisi nel RCIN Roll, importanti sperimentalmente perchè segnalano un avvicinamento a un ostacolo di colore nero, che non viene rilevato

dai sensori: in quel momento l'operatore ha influito manualmente, per recuperare la situazione instabile ed evitare la collisione. La risposta del drone è abbastanza fedele al comando desiderato, ma si notano ritardi e overshoot, legati a un lieve drift del roll che veniva inevitabilmente accumulato durante il volo a causa dell'ambiente indoor che mette a dura prova la calibrazione del compass.

In sintesi, da questi grafici vediamo chiaramente la differenza tra il comando del pilota e il risultato effettivo, anche se il momento dell'evitamento dell'ostacolo è meno esasperato rispetto alla modalità di volo ALTHOLD, che in sè è molto meno raffinata: in LOITER, essendo sia la quota che la posizione costante, il drone tende a tenere molto meglio la posizione in cui si trova, per cui ogni suo movimento è più dolce.

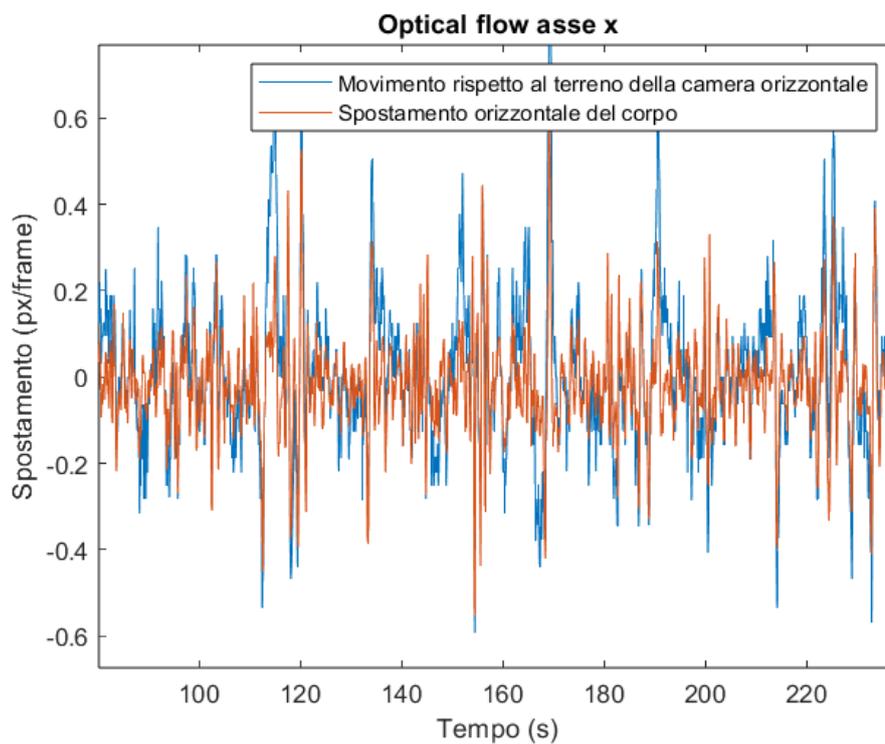


Figura 4.10: Funzionamento dell'Optical Flow sulle ascisse

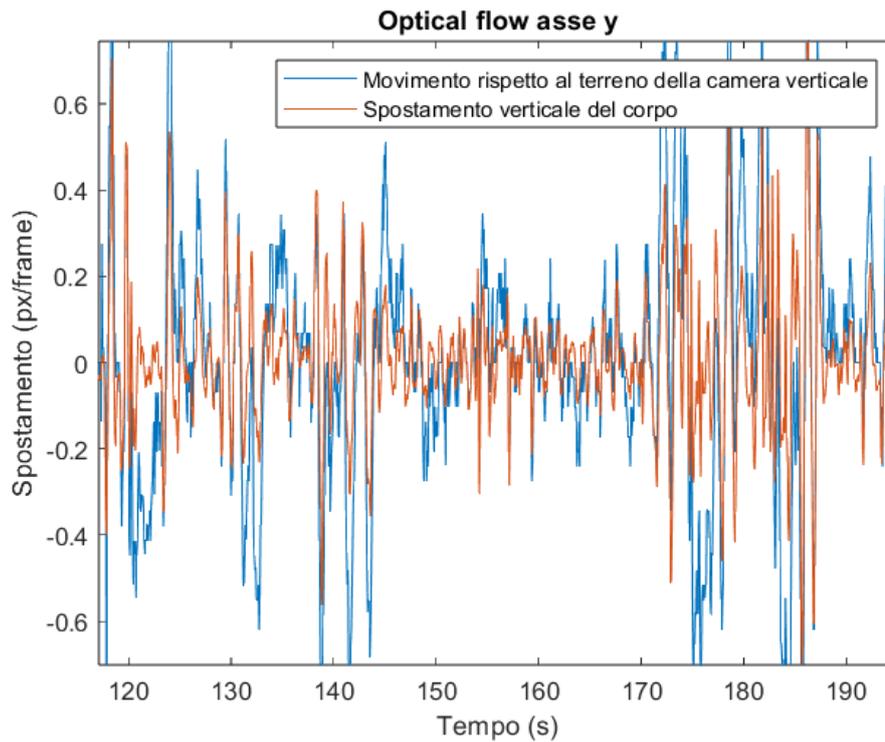


Figura 4.11: Funzionamento dell’Optical Flow sulle ordinate

L’optical flow si dimostra particolarmente efficace nella modalità di volo Loiter, come evidenziato dai grafici sperimentali presentati: in tale modalità, infatti, il sensore viene sfruttato attivamente dal controllore per mantenere la posizione orizzontale del drone, ossia le coordinate nel piano XY. Il contributo dell’optical flow, tuttavia, non è utilizzato isolatamente: i dati vengono fusi all’interno dell’Extended Kalman Filter (EKF), che integra le misure del sensore con quelle provenienti dagli accelerometri e giroscopi (IMU) e dal LiDAR, generando così una stima robusta e coerente della posizione del drone nel tempo. Pertanto, la modalità Loiter rappresenta il contesto operativo ideale per valorizzare le potenzialità di questo sensore: l’optical flow assume un ruolo cruciale, trasformandosi in un vero e proprio sensore di navigazione orizzontale, efficace anche in ambienti non strutturati e senza supporto di sistemi esterni di localizzazione.

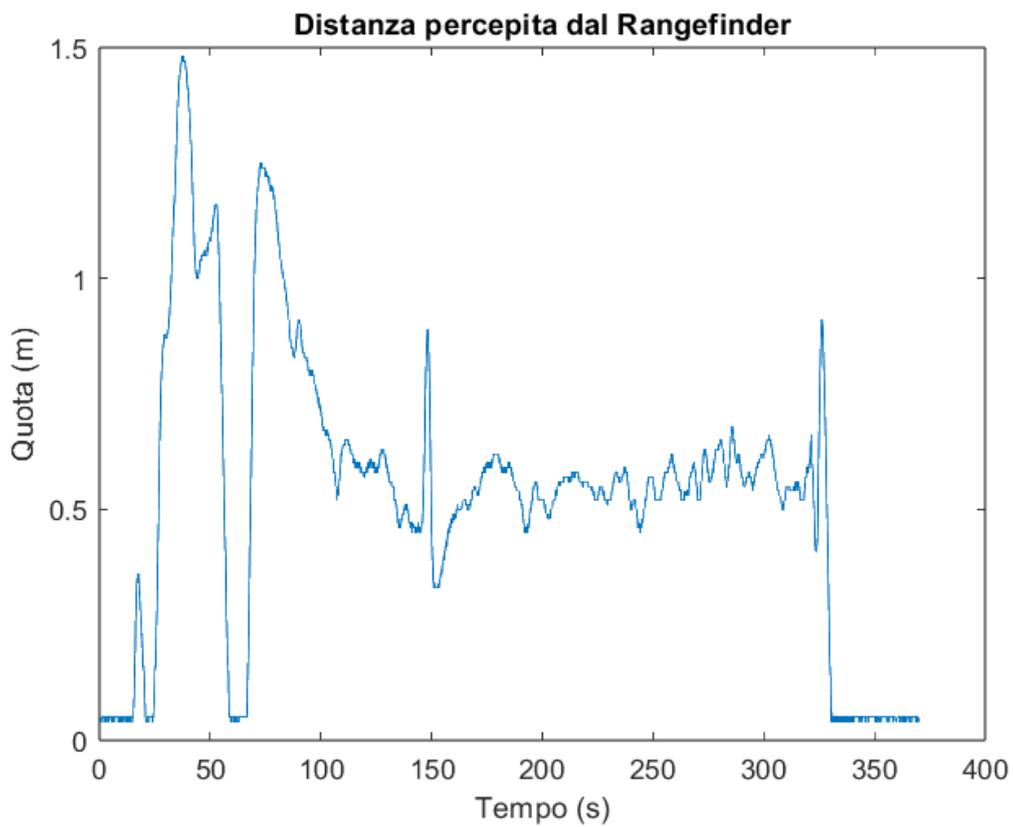


Figura 4.12: Distanza dal suolo rilevata dal LiDAR

Un discorso analogo può essere fatto per i dati rilevati dal LiDAR, estremamente più accurati e sensati: in Loiter, il rangefinder viene fuso con dati optical flow e barometrici tramite EKF con filtri che compensano oscillazioni o errori momentanei.

## 4.5 Confronto sulle modalità di volo utilizzate

Nel contesto dell'esperimento, la scelta tra le modalità Loiter e AltHold influisce in modo sostanziale sulla stabilità e sul comportamento del drone, soprattutto quando si utilizzano sensori come Optical Flow e LiDAR, sia fisso che 360: entrambe permettono un volo senza GPS, ma il loro funzionamento e il grado di automazione sono molto diversi.

La modalità **AltHold** è nata per mantenere costante l'altitudine del drone, basandosi su sensori come il barometro o il rangefinder; tuttavia il controllo della posizione orizzontale è completamente affidato al pilota: non esiste una stabilizzazione automatica, né viene utilizzato l'Optical Flow per compensare eventuali derive: ne risulta che, anche con sensori perfettamente funzionanti, il drone può muoversi lateralmente se influenzato da fattori esterni e il pilota deve intervenire manualmente per correggerne la traiettoria.

Al contrario, la modalità **Loiter** è concepita per mantenere automaticamente sia la posizione orizzontale che l'altitudine: quando utilizzata indoor, dove il segnale GPS è assente o inaffidabile, il drone può fare affidamento sull'Optical Flow per stimare il movimento sul piano XY e sul Rangefinder per determinare l'altitudine rispetto al suolo. Questi dati vengono poi elaborati dall'EKF, che fonde le misure dei vari sensori per fornire una stima robusta della posizione: in questo modo, Loiter consente al drone di mantenere fissa la posizione anche in assenza di GPS, correggendo automaticamente ogni minima deriva. Dunque la principale differenza tra le due modalità riguarda la stabilizzazione: in Loiter, il drone cerca attivamente di mantenere un assetto livellato e una posizione fissa, anche in presenza di disturbi o comandi minimi, in AltHold, invece, se il drone si inclina o riceve una spinta laterale, non effettua alcuna correzione autonoma, limitandosi a regolare la spinta verticale per mantenere la quota.

In sintesi, la modalità Loiter è nettamente superiore ad AltHold per operazioni indoor che richiedono stabilità, precisione e uso di sensori avanzati. AltHold rimane invece utile per test basilari, voli manuali o scenari in cui si desidera mantenere il completo controllo del movimento orizzontale.



Figura 4.13: Drone in avvicinamento agli ostacoli

# Capitolo 5

## Conclusioni

Questo elaborato ha dimostrato come sia concretamente possibile ottenere prestazioni di volo affidabili e ripetibili in ambienti indoor complessi anche utilizzando una piattaforma a basso costo, purché si proceda con un'attenta integrazione di componenti sensoriali selezionati e una configurazione software ben calibrata. Il cuore del sistema è rappresentato dalla piattaforma open source ArduPilot, la cui maturità, versatilità e ampia comunità di sviluppo costituiscono un elemento abilitante fondamentale per la ricerca sperimentale.

Nonostante le naturali limitazioni in termini di robustezza meccanica, certificazioni industriali e supporto commerciale, il sistema autocostruito ha dimostrato capacità operative sorprendentemente stabili, con un comportamento in hovering e tracking che si è mantenuto entro margini di errore ampiamente accettabili, anche in condizioni non ideali di luce e superfici di riferimento non propriamente consone.

Il drone utilizza come flight controller il Cube Black +, una piattaforma modulare ad elevate prestazioni, capace di gestire in tempo reale la fusione di sensori eterogenei tramite l'algoritmo di stima EKF3 (Extended Kalman Filter 3). Il setup sperimentale include:

- Il sensore HereFlow per l'optical flow, dotato di IMU integrata, impiegato per la stima della velocità orizzontale rispetto alla superficie sottostante;
- Un sensore Benewake TFmini-S, LiDAR time-of-flight a fascio singolo, installato verticalmente per la misura precisa dell'altitudine e la stabilizzazione in hovering;
- Un sistema Terraranger Evo Tower, costituito da più moduli LiDAR disposti a 360°, utilizzato per l'obstacle avoidance e la percezione ambientale laterale;
- Gli IMU (accelerometri e giroscopi triassiali) e il barometro integrati nel Cube Black, usati per l'orientamento e la misura della quota relativa;
- L'uso della modalità di volo Loiter, che consente al drone di mantenere automaticamente la posizione e l'assetto tramite feedback continuo dei sensori.

Le prove di volo, svolte in ambienti chiusi privi di segnale GPS e con marker di riferimento a terra, hanno evidenziato una buona capacità del sistema di mantenere la posizione in hovering e reagire correttamente a disturbi esterni, senza necessità di

ricorrere a telecamere stereo, a sistemi SLAM o a sensori di fascia alta. L'accuratezza osservata nella stima della posizione è risultata adeguata a compiti di ispezione, esplorazione o test di algoritmi di controllo, anche in assenza di localizzazione assoluta.

Il risultato è tanto più rilevante se posto a confronto con le prestazioni di droni commerciali di fascia alta, come il Flyability Elios 3, il L-380 o il Terra Xross 1: queste soluzioni offrono tecnologie di navigazione avanzata, mappatura 3D in tempo reale basata su SLAM LiDAR o visuale, payload multispettrali o termici e robusti involucri protettivi in grado di operare anche in ambienti contaminati o polverosi. Tuttavia, tali vantaggi tecnologici si accompagnano a costi molto elevati (tipicamente superiori a 50.000 €), architetture chiuse e una ridotta possibilità di modifica o personalizzazione del comportamento del drone da parte dell'utente finale.

In contrasto con queste piattaforme, il drone qui sviluppato presenta i seguenti vantaggi:

- Costo estremamente ridotto (complessivamente inferiore a 1000 €), che lo rende accessibile anche per applicazioni didattiche o di ricerca universitaria;
- Controllo completo sui parametri di volo, con possibilità di modificare ogni aspetto del comportamento del sistema tramite interfaccia parametrica o accesso al codice sorgente;
- Personalizzazione hardware, con la possibilità di integrare sensori differenti (LiDAR, sonar, camera, IMU) a seconda dello scenario applicativo;
- Autonomia di volo superiore rispetto a molte piattaforme professionali dotate di payload pesanti e protezioni ingombranti, che spesso riducono notevolmente i tempi di missione.

Naturalmente, l'assenza di protezioni anticollisione, la maggiore fragilità strutturale e la mancanza di strumenti di localizzazione assoluta o di mappatura in tempo reale pongono dei limiti importanti per l'impiego operativo in scenari critici; tuttavia, se utilizzato per finalità di sviluppo, test, o navigazione assistita in ambienti noti, il sistema si comporta in modo sorprendentemente stabile ed efficace.

In conclusione, l'esperienza maturata con questo progetto conferma che, tramite un'attenta pianificazione e l'impiego di strumenti open source ben supportati, è possibile realizzare un drone autonomo indoor capace di affrontare missioni complesse con costi contenuti, buone prestazioni e un grado di flessibilità che supera di gran lunga quello dei sistemi commerciali. Con opportuni upgrade futuri, come l'integrazione di LiDAR 2D/3D, telecamere depth, moduli di visione artificiale e algoritmi SLAM su piattaforma companion computer, sarà possibile incrementare ulteriormente le capacità operative, mantenendo al tempo stesso l'accessibilità e la libertà progettuale tipiche dei sistemi open-source.

# Bibliografia

- [1] ArduPilot Dev Team. *Flight Modes — ArduPilot Documentation*, 2024. <https://ardupilot.org/copter/docs/flight-modes.html>
- [2] ArduPilot Dev Team. *BendyRuler Obstacle Avoidance Algorithm*, 2024. <https://ardupilot.org/dev/docs/code-overview-object-avoidance.html>
- [3] Hex Technology. *Cube Black+ Autopilot Reference*, 2022. <https://docs.cubepilot.org/user-guides/cube-black/cube-black-overview>
- [4] Proficnc and Hex Technology. *HereFlow Optical Flow Sensor*, 2022. <https://docs.cubepilot.org/user-guides/hereflow/hereflow-overview>
- [5] Benewake. *TFmini-S LiDAR Range Finder — Benewake* <https://www.benewake.com/en/tfmini.html>
- [6] Terabee. *TeraRanger Evo Tower — Specification Sheet*, 2023. <https://www.terabee.com/shop/lidar-tof-range-finders/teraranger-evo-tower/>
- [7] Flyability SA. *Elios 3 – Collision-Tolerant Drone for Inspection*, 2024. <https://www.flyability.com/elios-3>
- [8] LAF Systems. *L-380 Indoor Inspection UAV*, 2023. <https://www.lafsystems.com/l-380>
- [9] Terra Drone Corporation. *TERRA Xross 1 - Underground Utility Inspection Drone*, 2024. <https://www.terra-drone.net/global/xross1/>
- [10] Mur-Artal, R. and Tardós, J. D. *ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras*. *IEEE Transactions on Robotics*, 33(5), pp. 1255–1262, 2017.
- [11] Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D. *Probabilistic Robotics*. MIT Press, 2005.
- [12] Barfoot, T. D. *State Estimation for Robotics*. Cambridge University Press, 2017.
- [13] Beard, R. W. and McLain, T. W. *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press, 2012.
- [14] Kuestner, C. et al. *A Modular Quadrotor Control Stack for Research and Education*. arXiv preprint arXiv:1907.08597, 2019.

- [15] Mahony, R., Hamel, T. and Pflimlin, J.-M. *Nonlinear Complementary Filters on the Special Orthogonal Group*. IEEE Transactions on Automatic Control, 53(5), pp. 1203–1218, 2008.
- [16] Faessler, M. et al. *Differential Flatness of Quadrotor Dynamics for Trajectory Generation*. IEEE ICRA, 2017.
- [17] Dronecode Foundation. *PX4 Autopilot Official Site*, 2024. <https://px4.io>
- [18] GitHub Community. *Awesome SLAM — curated list of SLAM frameworks*, 2024. <https://github.com/OpenSLAM/awesome-slam>
- [19] ArduPilot Dev Team. *ArduPilot EKF3 Estimation System*, 2024. <https://ardupilot.org/dev/docs/ekf3.html>
- [20] Apache Software Foundation. *NuttX Real-Time Operating System*, 2024. <https://nuttx.apache.org/>
- [21] Trawny, N. *Quaternion Algebra and Sensor Fusion for Navigation*. JPL Internal Report, 2005.
- [22] Dronecode Foundation. *PX4 Autopilot Documentation*, 2024. <https://docs.px4.io/>
- [23] ChibiOS Project. *ChibiOS Real-Time Operating System*, 2024. <http://www.chibios.org/>
- [24] Przybylski, S. *The Math Behind Extended Kalman Filtering*, 2023. [https://medium.com/@sasha\\_przybylski/the-math-behind-extended-kalman-filtering-0df981a87453](https://medium.com/@sasha_przybylski/the-math-behind-extended-kalman-filtering-0df981a87453)
- [25] Drone U. *SLAM explained for drones*, 2024. <https://www.thedroneu.com/blog/slam-explained-for-drones/>