

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA TOR VERGATA
MACROAREA DI INGEGNERIA



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
Ingegneria dell'Automazione

TESI DI LAUREA IN
Analisi e Sintesi di Sistemi Non Lineari

TITOLO

*Progettazione e Realizzazione di un
Veicolo Autonomo Teleoperato in CANOpen*

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Daniele Carnevale

Laureando:
matricola: 0300125
Andrea Efficace

Correlatore:
Dott. Ing. *Roberto Masocco*
Ing. *Moreno Mattia*

Anno Accademico 2024/2025

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Daikin Applied Europe	5
1.1.1	L'Automazione e il reparto di Industrial Innovation	5
1.2	Obiettivo di Tesi	6
1.3	Struttura della Tesi	6
2	Robot Mobili e Autonomi	7
2.1	Classificazione dei Robot Mobili	7
2.2	Sistemi di Navigazione e Localizzazione	7
2.3	Algoritmi di Navigazione	8
2.3.1	Pianificazione del Percorso (Path Planning)	8
2.3.2	Evitamento degli Ostacoli (Obstacle Avoidance)	8
2.3.3	SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)	9
2.4	Protocolli di Comunicazione Industriali	10
2.4.1	CAN Bus	10
2.4.2	CANopen	11
2.4.3	Altri Protocolli	12
3	Requisiti e Specifiche	13
3.1	Selezione del Payload	13
3.2	Requisiti del Veicolo	14
3.3	Specifiche Tecniche	15
3.4	Sistemi di bordo e Sensoristica	16
3.5	Sistema di Movimentazione	17
3.6	Selezione componenti	18
3.6.1	Motori	19
3.6.2	Verifica dei Requisiti di Trazione	20
3.6.3	Batteria	21
3.6.4	Verifica dei Requisiti Energetici	22
3.6.5	Driver per Motori Elettrici	24
3.6.6	Computer di Bordo	24
3.7	Sensoristica	27
3.7.1	LiDAR	27
3.7.2	Encoder	30
3.7.3	Sonda di Temperatura	31

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Daikin Applied Europe

Daikin è un'azienda multinazionale giapponese specializzata nella produzione di sistemi di climatizzazione e soluzioni per il riscaldamento. Fondata nel 1924, Daikin è diventata uno dei principali attori nel settore HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) a livello globale. La sede *Applied* di Roma, in particolare, si occupa della progettazione e produzione di unità di trattamento aria (UTA) e sistemi di climatizzazione per applicazioni commerciali e industriali, prevalentemente rivolto al mercato europeo e con produzione di tipo *make-to-order*¹.

L'andamento crescente del mercato della climatizzazione, unito alla crescente domanda di soluzioni efficienti e personalizzate (es. datacenter, ospedali, centri commerciali), ha portato DAE a investire sempre più risorse nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie per migliorare non solo i prodotti offerti, ma anche i processi che ne permettono la costruzione.

1.1.1 L'Automazione e il reparto di Industrial Innovation

All'interno dell'azienda, il reparto di Industrial Innovation si occupa di implementare soluzioni innovative per ottimizzare i processi produttivi e migliorare l'efficienza operativa a diversi livelli. Alcuni esempi di progetti sviluppati includono:

- L'implementazione di sistemi di monitoraggio in tempo reale della produzione mediante Manufacturing Execution System (MES).
- Sistemi di collaudo automatico di sottoassiemi e prodotti finiti mediante test-bench dedicati.
- L'adozione di tecnologie di visione artificiale per il controllo qualità e l'ispezione dei componenti.
- L'integrazione di robot mobili per la movimentazione di materiali all'interno dello stabilimento.

L'adozione di queste tecnologie, in forma integrata e sinergica, ha l'obiettivo di trainare l'azienda verso un modello di industria più informatizzato ed efficiente, in linea con i principi dell'Industria 5.0.

¹Tipologia di produzione per la quale il prodotto è realizzato su specifica del cliente

1.2 Obiettivo di Tesi

L'obiettivo della tesi è stato quello di progettare e realizzare un veicolo autonomo, in grado di muoversi all'interno del complesso produttivo dello stabilimento di Ariccia (RM). L'intento è quello di valutare le difficoltà e le potenzialità legate all'implementazione di un sistema di trasporto autonomo in un ambiente industriale reale, nel quale la produzione make-to-order comporta la difficoltà di dover gestire percorsi e destinazioni variabili in funzione:

- Delle esigenze produttive giornaliere.
- Della disposizione degli spazi, che può variare in funzione delle necessità logistiche.
- Della presenza di ostacoli dinamici, come operatori e carrelli elevatori.

Quello a cui si è voluto mirare è pertanto la transizione da una tipologia di movimentazione manuale e che richiede l'intervento umano (tramite carrelli o muletti elettrici) e un costo elevato in termini di tempo e risorse, a una soluzione automatizzata che permetta di ridurre i costi operativi e aumentare l'efficienza logistica all'interno dello stabilimento in futuro, introducendo ottimizzazioni sullo stockaggio e la distribuzione dei materiali.

Ad esempio, collegando il veicolo autonomo a un sistema di gestione del magazzino (WMS) e a un sistema di pianificazione della produzione (ERP), sarebbe possibile automatizzare l'intero processo di movimentazione dei materiali, dalla richiesta alla consegna, riducendo al minimo l'intervento umano e gli errori associati alla ricerca e al trasporto dei componenti.

Nota: Il nucleo progettuale è stato quello di mantenere i costi di realizzazione del veicolo il più bassi possibile, in modo da rendere il prototipo una demo economica per dimostrare le potenzialità della tecnologia e valutarne l'effettiva applicabilità in un contesto industriale reale.

1.3 Struttura della Tesi

Nei capitoli successivi verranno approfonditi i seguenti argomenti:

- Capitolo 2: Panoramica sulle tecnologie di veicoli autonomi, con particolare attenzione ai sistemi di navigazione e localizzazione e ai protocolli di comunicazione industriali.
- Capitolo 3: Analisi dei requisiti e specifiche del veicolo autonomo progettato per l'ambiente industriale considerato. Selezione componenti hardware.
- Capitolo 4: Prototipazione meccanica ed elettronica del veicolo.
- Capitolo 5: Analisi del modello cinematico e proposta di algoritmi di controllo per la navigazione autonoma.
- Capitolo 6: Architettura software implementata per la gestione del veicolo e l'integrazione dei sensori.
- Capitolo 7: Futuri test sperimentali e possibili sviluppi del progetto.

Capitolo 2

Robot Mobili e Autonomi

In questo capitolo verranno analizzate le principali tecnologie e metodologie utilizzate nei robot mobili autonomi, con particolare attenzione ai sistemi di navigazione e localizzazione.

2.1 Classificazione dei Robot Mobili

I robot mobili autonomi (AMR - Autonomous Mobile Robots) sono veicoli in grado di muoversi e operare in ambienti complessi senza la necessità di un controllo umano diretto. Questi robot sono dotati di sensori, attuatori e algoritmi di controllo e localizzazione che consentono loro di percepire l'ambiente circostante, prendere decisioni e navigare in modo sicurezza per se stessi e gli elementi presenti nell'ambiente (es operatori, ostacoli, ecc.).

Alcuni esempi di robot mobili autonomi includono:

- **Robot a ruote:** Utilizzano ruote per la locomozione e sono adatti per superfici piane e lisce. Esempi includono carrelli elevatori autonomi e robot di consegna.
- **Robot a cingoli:** Utilizzano cingoli per la locomozione e sono adatti per terreni irregolari e accidentati. Sono utili per lavori di esplorazione e soccorso in ambienti difficili.
- **Robot a gambe:** Utilizzano sistemi che ricordano arti umani o animali e sono in grado di affrontare terreni complessi e ostacoli. Di particolare interesse negli ultimi anni sono i robot quadrupedi, come quelli sviluppati da Boston Dynamics.
- **Robot volanti:** Utilizzano eliche o ali per la locomozione e sono in grado di volare. Esempi includono droni e veicoli aerei senza pilota (UAV).

Una categoria analoga ai robot mobili autonomi sono i veicoli a guida autonoma (AGV - Automated Guided Vehicles), che sono progettati per operare in ambienti industriali e di magazzino, seguendo percorsi predefiniti e ben strutturati che consentono di evitare logiche di navigazione complesse. Un esempio comune sono carrelli detti *segui-linea*, che seguono linee tracciate sul pavimento o nastri magnetici per spostarsi all'interno di un magazzino o di una fabbrica.

2.2 Sistemi di Navigazione e Localizzazione

I robot mobili autonomi utilizzano una combinazione di sensori, algoritmi di localizzazione e tecniche di mappatura per navigare in ambienti complessi. Alcuni dei principali sistemi e tecnologie utilizzati includono:

- **Sensori di Prossimità:** Utilizzati per rilevare ostacoli e misurare distanze. Esempi comuni includono sensori a ultrasuoni, sensori infrarossi e LIDAR (Light Detection and Ranging).
- **Sistemi di Localizzazione:** Tecnologie come GPS, SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) e sistemi di localizzazione basati su visione vengono utilizzati per determinare la posizione del robot nell'ambiente.
- **Sistemi di Visione:** Telecamere, sensori di profondità e marker (es. QR-code) vengono utilizzati per acquisire informazioni visive sull'ambiente circostante, consentendo al robot di riconoscere oggetti e ostacoli.
- **Mappe Ambientali:** I robot possono utilizzare mappe predefinite o creare mappe in tempo reale dell'ambiente circostante per facilitare la navigazione.

2.3 Algoritmi di Navigazione

Gli algoritmi di navigazione sono fondamentali per consentire ai robot mobili autonomi di pianificare e seguire traiettorie sicure ed efficienti. Di seguito vengono presentati i principali approcci utilizzati.

2.3.1 Pianificazione del Percorso (Path Planning)

La pianificazione del percorso consiste nel determinare una traiettoria che collega un punto di partenza a una destinazione, evitando gli ostacoli presenti nell'ambiente. I principali algoritmi includono:

- **A* (A-star) [11]:** Algoritmo di ricerca su grafi che trova il percorso ottimale combinando il costo effettivo del tragitto con una stima euristica della distanza rimanente. È ampiamente utilizzato per la sua efficienza e garanzia di ottimalità.
- **Dijkstra [7]:** Algoritmo classico che esplora sistematicamente tutti i nodi di un grafo per trovare il percorso più breve. Garantisce la soluzione ottimale ma può risultare computazionalmente oneroso in ambienti ampi.
- **RRT (Rapidly-exploring Random Trees) [13]:** Algoritmo probabilistico che costruisce un albero di esplorazione espandendosi casualmente nello spazio. È particolarmente adatto per spazi ad alta dimensionalità e ambienti complessi.

2.3.2 Evitamento degli Ostacoli (Obstacle Avoidance)

Una volta pianificato il percorso, il robot deve essere in grado di reagire a ostacoli imprevisti o dinamici. Le tecniche più comuni sono:

- **VFH (Vector Field Histogram) [4]:** Crea un istogramma polare delle distanze dagli ostacoli e seleziona la direzione di movimento più sicura e vicina all'obiettivo.

- **DWA (Dynamic Window Approach)** [9]: Valuta un insieme di velocità ammissibili considerando i vincoli cinematici del robot e seleziona quella che massimizza il progresso verso l'obiettivo minimizzando il rischio di collisione.
- **Potential Fields** [12]: Modello l'obiettivo come un attrattore e gli ostacoli come repulsori, generando un campo di forze che guida il movimento del robot.

2.3.3 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

Lo SLAM è una tecnica che permette al robot di costruire una mappa dell'ambiente circostante mentre simultaneamente si localizza al suo interno [8]. Questo approccio è fondamentale quando non è disponibile una mappa predefinita. Gli algoritmi SLAM più diffusi includono:

- **EKF-SLAM**: Basato sul filtro di Kalman esteso, adatto per ambienti di dimensioni limitate.
- **Particle Filter SLAM** [16]: Utilizza un insieme di particelle per rappresentare le possibili posizioni del robot, robusto in presenza di incertezze elevate.
- **Graph-based SLAM** [10]: Rappresenta il problema come un grafo di vincoli tra pose successive, ottimizzando globalmente la traiettoria stimata.

La scelta dell'algoritmo dipende dalle caratteristiche specifiche dell'applicazione, come la complessità dell'ambiente, i requisiti di tempo reale, la sensoristica e le risorse computazionali disponibili.

FAST-LIO 2

Come spiegheremo nei capitoli successivi, si è scelto di equipaggiare il robot con un sensore LiDAR 3D dotato di IMU (Inertial Measurement Unit). Conseguentemente, si è scelto di adottare un algoritmo di SLAM che permettesse di integrare efficacemente i dati provenienti da questi sensori.

La scelta è ricaduta su **FAST-LIO 2** [17], un algoritmo di odometria LiDAR-inerziale (LIO) ad alte prestazioni sviluppato presso l'Università di Hong Kong. FAST-LIO 2 è progettato per fornire stima dello stato in tempo reale con elevata accuratezza, anche in ambienti complessi e con risorse computazionali limitate.

L'algoritmo si basa su un filtro di Kalman esteso iterato (*iterated Extended Kalman Filter*, iEKF) strettamente accoppiato (*tightly-coupled*), che fonde direttamente le misure grezze del LiDAR con i dati dell'IMU. A differenza degli approcci tradizionali basati sull'estrazione di feature, FAST-LIO 2 utilizza un approccio *direct* che registra direttamente i punti della nuvola LiDAR sulla mappa, eliminando la necessità di estrarre caratteristiche geometriche come spigoli e superfici planari.

Le principali innovazioni di FAST-LIO 2 includono:

- **Registrazione diretta dei punti**: L'algoritmo registra ogni punto della scansione LiDAR direttamente sulla mappa globale, senza passare per l'estrazione di feature. Questo approccio migliora la robustezza in ambienti con poche caratteristiche geometriche distintive.

- **ikd-Tree:** Una struttura dati incrementale basata su k-d tree che permette l'inserimento, la cancellazione e la ricerca dei punti più vicini in modo efficiente. Questa struttura consente di mantenere e aggiornare la mappa in tempo reale con un overhead computazionale minimo.
- **Compensazione del moto:** I dati dell'IMU vengono utilizzati per compensare la distorsione della nuvola di punti causata dal movimento del sensore durante la scansione, garantendo una ricostruzione accurata dell'ambiente.
- **Calcolo efficiente del guadagno di Kalman:** L'algoritmo sfrutta la struttura sparsa del problema per calcolare il guadagno di Kalman in modo efficiente, riducendo la complessità computazionale.

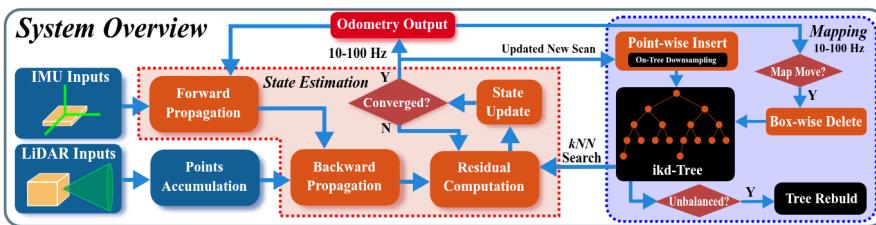


Figura 2.1: Diagramma a blocchi dell'algoritmo FAST-LIO 2. Adattato da [17].

Grazie a queste caratteristiche, FAST-LIO 2 è in grado di operare a frequenze elevate (superiori a 100 Hz su hardware embedded) mantenendo un'accuratezza paragonabile o superiore agli algoritmi stato dell'arte, rendendolo particolarmente adatto per applicazioni robotiche che richiedono localizzazione in tempo reale.

2.4 Protocolli di Comunicazione Industriali

Nei sistemi robotici mobili, la comunicazione tra i diversi componenti (sensori, attuatori, controllori) riveste un ruolo fondamentale. In ambito industriale e automotive, sono stati sviluppati diversi protocolli di comunicazione che garantiscono affidabilità, determinismo temporale e robustezza in ambienti operativi critici.

2.4.1 CAN Bus

Il **CAN** (Controller Area Network) [1] è un protocollo di comunicazione seriale sviluppato da Bosch negli anni '80, originariamente per applicazioni automotive. Si tratta di un bus multi-master che permette a più nodi di comunicare senza la necessità di un controllore centrale. Le caratteristiche principali includono:

- **Arbitraggio non distruttivo:** In caso di trasmissioni simultanee, il messaggio con priorità più alta prevale senza corrompere i dati.
- **Rilevamento e gestione degli errori:** Il protocollo include meccanismi robusti di error detection (CRC, bit stuffing, frame check) e gestione automatica degli errori.

- **Velocità:** Fino a 1 Mbit/s per CAN classico, con estensioni come CAN-FD che raggiungono velocità superiori.
- **Affidabilità:** Progettato per ambienti con elevate interferenze elettromagnetiche, tipici del settore automotive e industriale.

2.4.2 CANopen

CANopen [6] è un protocollo di alto livello basato su CAN, standardizzato dalla CiA (CAN in Automation) e ampiamente utilizzato in automazione industriale, robotica e veicoli elettrici. Mentre CAN definisce solo il livello fisico e di collegamento dati, CANopen aggiunge un livello applicativo che standardizza la comunicazione tra dispositivi eterogenei.

Le caratteristiche fondamentali di CANopen includono:

- **Object Dictionary (OD):** Ogni dispositivo CANopen espone un dizionario di oggetti che descrive tutte le sue funzionalità, parametri e dati. Questo approccio permette una configurazione standardizzata e l'interoperabilità tra dispositivi di produttori diversi.
- **PDO (Process Data Objects):** Messaggi ad alta priorità per lo scambio di dati di processo in tempo reale, come comandi di velocità o lettura di encoder. I PDO sono configurabili e permettono di ottimizzare la larghezza di banda.
- **SDO (Service Data Objects):** Messaggi per la configurazione e la lettura/scrittura di parametri nel dizionario oggetti. Utilizzano un protocollo client-server con conferma.
- **NMT (Network Management):** Servizi per la gestione dello stato dei nodi (pre-operational, operational, stopped) e il monitoraggio della rete tramite heartbeat e node guarding.
- **SYNC e EMCY:** Messaggi di sincronizzazione per coordinare le operazioni dei nodi e messaggi di emergenza per segnalare condizioni di errore.

Nel contesto del veicolo autonomo oggetto di questa tesi, CANopen è stato scelto come protocollo di comunicazione principale per il controllo degli attuatori (motori di trazione e sterzo). Questa scelta è motivata da diversi fattori:

- **Standardizzazione dei profili dispositivo:** CANopen definisce profili standard per diverse classi di dispositivi (CiA 402 per azionamenti, CiA 401 per I/O). Il profilo CiA 402 [5], in particolare, specifica una macchina a stati e modalità operative standard per il controllo di motori elettrici.
- **Determinismo temporale:** La comunicazione basata su PDO sincronizzati garantisce latenze predibibili, essenziali per il controllo in tempo reale del veicolo.
- **Diagnostica integrata:** I meccanismi di heartbeat ed emergency permettono di rilevare rapidamente guasti o disconnessioni dei nodi, aumentando la sicurezza del sistema.
- **Scalabilità:** È possibile aggiungere nuovi dispositivi alla rete senza modificare l'architettura esistente.

2.4.3 Altri Protocolli

Oltre a CAN e CANopen, esistono altri protocolli utilizzati in contesti simili, ciascuno con caratteristiche e ambiti di applicazione specifici.

- **EtherCAT [2]**: Protocollo Ethernet industriale ad alte prestazioni sviluppato da Beckhoff, con latenze nell'ordine dei microsecondi. A differenza di CANopen, EtherCAT utilizza Ethernet come mezzo fisico e sfrutta un'architettura master-slave con elaborazione "al volo" dei frame. Offre prestazioni superiori in termini di velocità e sincronizzazione, ma richiede hardware dedicato e risulta più complesso da implementare. È la scelta preferita per applicazioni di motion control ad alta dinamica.
- **PROFINET [3]**: Standard Ethernet industriale promosso da Siemens, diffuso nell'automazione di fabbrica. Rispetto a CANopen, PROFINET offre maggiore larghezza di banda e integrazione nativa con i sistemi Siemens, ma è meno diffuso nel settore della robotica mobile e dei veicoli elettrici. La versione PROFINET IRT (Isochronous Real-Time) garantisce determinismo paragonabile a EtherCAT.
- **Modbus [15]**: Protocollo seriale sviluppato da Modicon nel 1979, uno dei più semplici e diffusi nell'automazione industriale. Utilizza un'architettura master-slave con comunicazione request-response. Rispetto a CANopen, Modbus è più semplice da implementare ma offre funzionalità limitate: non prevede meccanismi nativi di sincronizzazione, gestione degli errori avanzata o profili dispositivo standardizzati. È adatto per applicazioni con requisiti di tempo reale meno stringenti.
- **Modbus TCP [14]**: Estensione di Modbus su rete Ethernet/TCP-IP. Mantiene la semplicità del protocollo originale aggiungendo i vantaggi dell'infrastruttura Ethernet (maggiore velocità, distanze più lunghe, integrazione con reti IT). Tuttavia, l'utilizzo di TCP introduce latenze non deterministiche, rendendolo meno adatto rispetto a CANopen per il controllo in tempo reale di attuatori critici.

La scelta del protocollo dipende dai requisiti specifici dell'applicazione in termini di latenza, throughput, numero di nodi e compatibilità con i dispositivi disponibili. Nel caso del veicolo oggetto di questa tesi, CANopen rappresenta il miglior compromesso tra prestazioni real-time, standardizzazione dei profili per azionamenti elettrici e disponibilità di componenti compatibili.

Capitolo 3

Requisiti e Specifiche

3.1 Selezione del Payload

L'idea iniziale del progetto è stata quella di movimentare le sezioni ventilanti (SV) che compongono il sottoassieme superiore dei chiller prodotti nello stabilimento. La ragione di questo obiettivo risiede nel fatto che le SV sono componenti di grandi dimensioni, che vengono prodotte all'interno di uno dei capannoni dello stabilimento e successivamente poste negli spazi esterni in piazzole sparse in diversi punti, in attesa di essere assemblate sul prodotto finito.

Nota: Attualmente, una volta che una SV è pronta per passare alla fase di assemblaggio successiva, viene calettata su appositi supporti con ruote caster e trasportate tramite dei muletti elettrici. Questo richiede l'intervento di personale specializzato all'uso di carri e muletti, con conseguente dispendio di tempo e risorse.

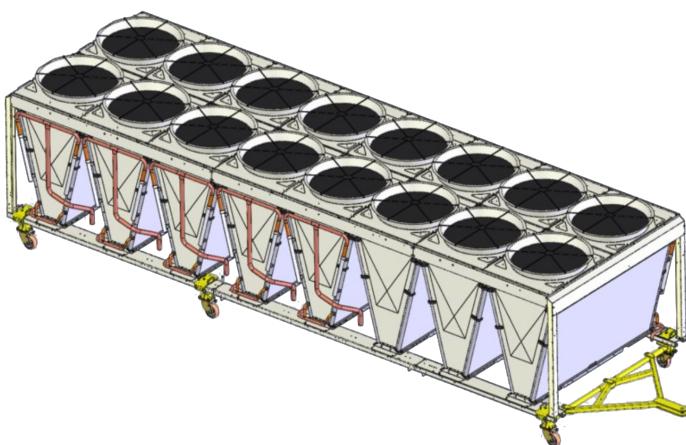


Figura 3.1: Modello 3D di una Sezione Ventilante di un Chiller, formata da 8 **Moduli a V**. Ogni modulo, ha dimensioni $(L \times W \times H)m = (2 \times 1 \times 1.5)m$. L'intero sottoassieme ha quindi dimensioni complessive di circa $(8 \times 2 \times 1.5)m$. Si possono apprezzare in giallo i supporti con ruote caster su cui viene calettata la SV.

Data la difficoltà di dover gestire delle strutture così ingombranti in un ambiente produttivo già di per sé complesso, si è deciso di ridefinire l'obiettivo del progetto, orientandolo la movimentazione dei compressori a vite, componenti di taglia standard dal peso contenuto. Questi sono componenti fon-

damentali per il funzionamento dei chiller, in quanto sono responsabili della compressione del refrigerante e del suo trasferimento attraverso il sistema di climatizzazione per attuare il ciclo termico e pertanto è di interesse primario una gestione logistica efficiente di questi componenti all'interno dello stabilimento.

Nota: I compressori a vite vengono prodotti in un capannone dedicato e distaccato rispetto a quello dove vengono prodotti i chiller. Una volta prodotti, questi vengono posti in una piazzola di stoccaggio esterna in attesa di essere prelevati e trasportati al reparto di assemblaggio dei chiller. Il trasporto avviene tramite muletti elettrici che inforcano delle pedane in ferro su cui sono posizionati i compressori.

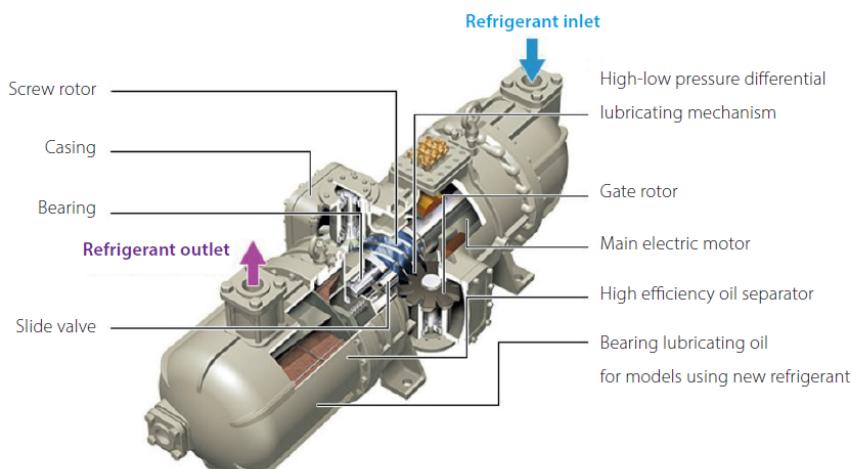


Figura 3.2: Compressore a vite Daikin, modello SM100. Peso: 70 kg. Dimensioni: $(L \times W \times H)m = (0.9 \times 0.4 \times 0.6)m$.

La scelta di questo payload ha permesso di definire requisiti più gestibili in termini di capacità di carico e dimensioni del veicolo. Si è comunque mantenuta l'idea di dimensionare i motori e la struttura del veicolo in modo da poter essere scalabile in futuro, qualora si volesse aumentare la capacità di carico per movimentare componenti più grandi come le SV.

3.2 Requisiti del Veicolo

In base alla scelta del payload e all'ambiente operativo, sono stati definiti i seguenti requisiti funzionali e prestazionali per il veicolo autonomo:

- **Limitare i costi:** Il progetto deve mirare a contenere i costi, usando il minimo numero di componenti necessari per raggiungere gli obiettivi prefissati e privilegiando soluzioni economiche ma affidabili.

- **Capacità di carico:** Il veicolo deve essere in grado di trasportare un carico utile minimo di 1000 kg, per garantire la movimentazione sicura del compressore a vite e di eventuali accessori o attrezzi aggiuntivi.
- **Velocità massima:** La velocità massima del veicolo deve essere al massimo di 1 m/s, per garantire la sicurezza degli operatori e la stabilità del carico durante il trasporto.
- **Tipologia di motori:** Tutti i motori (trazione e sterzo) devono essere elettrici, per ridurre l'impatto ambientale e facilitare la manutenzione.
- **Alimentazione:** Il veicolo deve essere alimentato a batteria, per garantire l'autonomia operativa e la flessibilità di movimento all'interno dello stabilimento.
- **Autonomia operativa:** Il veicolo deve essere in grado di operare almeno per 4 ore prima di ricaricarsi.
- **Navigazione e localizzazione:** Il veicolo deve essere in grado di navigare autonomamente all'interno dello stabilimento, evitando ostacoli statici e dinamici.
- **Manovrabilità:** Il veicolo deve essere in grado di effettuare manovre semplici come: traiettorie rettilinee, curve morbide, rotazioni sul posto e traslazioni laterali.
- **Interfaccia di controllo:** Il veicolo deve essere dotato di un'interfaccia di controllo che permetta la programmazione delle rotte, il monitoraggio dello stato del veicolo e l'intervento manuale in caso di emergenza.
- **Spazio Operativo:** Il veicolo deve essere in grado di operare in esterna, su asfalto e cemento, e in interna, su pavimentazioni industriali.

3.3 Specifiche Tecniche

Considerando i requisiti funzionali e prestazionali, calcoliamo le specifiche tecniche che deve avere il veicolo. Consideriamo, spesso sovradimensionando, i seguenti parametri:

- **Carico utile:** (robot + payload) 1000 kg
- **Velocità massima:** 1 m/s
- **Autonomia operativa:** 4 h
- **Raggio delle ruote:** 0.1 m
- **Pendenza massima affrontabile:** 10%, presa rispetto a una rampa di 0.3m di altezza per 3m di lunghezza. Corrispondente a circa 5.7°.
- **Attrito Statico:** Coefficiente di attrito statico tra ruota e asfalto $\mu_s = 0.5$.
- **Attrito Volvente:** Coefficiente di attrito volvente tra ruota e asfalto $\mu_r = 0.03$.

- **Vel. & Acc. max:** Supponendo di voler raggiungere una velocità massima di 1 m/s in 3 s, si ha un'accelerazione di $\sim 0.333 \text{ m/s}^2$.

Da questi dati, calcoliamo le seguenti specifiche tecniche affinché avvenga il primo distacco:

- In piano, dobbiamo vincere:

$$\begin{aligned} F_r &= \mu_r \cdot m \cdot g = 0.03 \cdot 1000 \cdot 9.81 = 294.3 \text{ N} \\ F_a &= m \cdot a = 1000 \cdot 0.333 = 333 \text{ N} \\ F_{tot} &= F_r + F_a = 294.3 + 333 = 627.3 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Quindi, la coppia totale richiesta è:

$$\tau_{tot} = F_{tot} \cdot r = 627.3 \cdot 0.1 = 62.73 \text{ Nm} \quad (3.2)$$

Che corrisponde a una potenza totale di:

$$P_{tot} = F_{tot} \cdot v = 627.3 \cdot 1 = 627.3 \text{ W} \quad (3.3)$$

- Su una pendenza del 10%, dobbiamo vincere:

$$\begin{aligned} F_{\parallel} &= m \cdot g \cdot \sin(\theta) = 1000 \cdot 9.81 \cdot \sin(5.7^\circ) = 973.6 \text{ N} \\ F_r &= \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) = 0.03 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot \cos(5.7^\circ) = 293.1 \text{ N} \\ F_a &= m \cdot a = 1000 \cdot 0.333 = 333 \text{ N} \\ F_{tot} &= F_{\parallel} + F_r + F_a = 973.6 + 293.1 + 333 = 1599.7 \text{ N} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Quindi, la coppia totale richiesta a ciascuna ruota è:

$$\tau_{tot} = F_{tot} \cdot r = 1599.7 \cdot 0.1 = 159.97 \text{ Nm} \quad (3.5)$$

Che corrisponde a una potenza totale di:

$$P_{tot} = F_{tot} \cdot v = 1599.7 \cdot 1 = 1599.7 \text{ W} \quad (3.6)$$

Approssimando la potenza totale necessaria a 1 kW, si è deciso di richiedere per la batteria una capacità energetica di almeno 4 kWh per garantire l'autonomia operativa di 4 ore.

Nota: In questa trattazione preliminare, non è stato calcolato l'effetto inerziale delle masse in rotazione né tantomeno le coppie necessarie ad eventuali motori di sterzo per orientare le ruote una volta messe sotto carico e/o in movimento. Questi aspetti più complessi sono stati demandati ai fornitori.

3.4 Sistemi di bordo e Sensoristica

Al fine di ottenere un sistema in grado di navigare autonomamente e di poter controllare i motori, si è deciso di dotare il veicolo di un sistema di bordo composto da:

- **Computer di bordo:** Un *Single Board Computer* (SBC) con capacità di calcolo sufficiente per eseguire gli algoritmi di navigazione e controllo in tempo reale. Si è optato per una soluzione basata su architettura x86 per garantire compatibilità con una vasta gamma di software e librerie, data anche la necessità di utilizzare ROS2 e Linux come sistema operativo e framework di sviluppo.
- **Inverter per motori PMAC:** Per il controllo dei motori di trazione e sterzo, si è scelto di utilizzare inverter compatibili con motori brushless a magneti permanenti (PMAC), in grado di fornire la potenza richiesta e di supportare protocolli di comunicazione industriali come CANOpen.
- **Batteria LiFePO4:** Per l'alimentazione del veicolo, si è optato per una batteria al litio-ferro-fosfato (LiFePO4) da almeno 4 kWh, in grado di garantire l'autonomia operativa richiesta e di supportare cicli di carica/scarica profondi senza degradazione significativa.
- **Sistema di comunicazione CAN:** Per l'integrazione e il controllo dei vari componenti del veicolo, si è scelto di utilizzare un adattatore USB-CAN, che permetta la comunicazione tra il computer di bordo e gli inverter dei motori in CAN bus.

Per la sensoristica, si è cercato di contenere il numero di sensori al minimo per ridurre i costi, selezionando solo quelli strettamente necessari per la navigazione autonoma e il controllo del veicolo:

- **LIDAR 3D:** Per la mappatura tridimensionale dell'ambiente circostante e l'individuazione di ostacoli. Il cono di visione del sensore scelto deve coprire almeno 180° in orizzontale e 30° in verticale, con una portata minima di 10 m.
- **Encoder sui motori:** Per la misurazione della velocità, della posizione degli sterzi e del numero di giri dei motori di trazione per un calcolo a valle della stima della posizione del veicolo tramite odometria.

Nota: La scelta di non utilizzare telecamere è stata dettata dalla volontà di non dover gestire eventuali problemi legati alla privacy degli operatori nelle prossimità del robot e tantomeno alla complessità della gestione della sicurezza informatica legata alla trasmissione di immagini video per evitare possibili attacchi di spionaggio industriale.

3.5 Sistema di Movimentazione

Per soddisfare i requisiti di manovrabilità, è risultata da subito ovvia la necessità di prevedere meccanismi di sterzo al fine di garantire la riuscita di manovre come rotazioni sul posto e traslazioni laterali. Tuttavia, introdurre meccanismi di sterzo avrebbe comportato un aumento della complessità meccanica andando a incidere sui costi complessivi del progetto. Si è quindi proceduto ad analizzare diverse configurazioni di ruote motrici e sterzanti per trovare un compromesso tra le richieste esplicite. Le configurazioni prese in considerazione sono state:

1. **4 ruote motrici e sterzanti:** Offre la massima trazione e manovrabilità, ma comporta costi elevati e complessità meccanica.
2. **2 ruote motrici + 2 ruote fisse:** Compromesso tra trazione e semplicità, ma con limitata capacità di sterzata tramite guida differenziale.
3. **2 ruote motrici e sterzanti + 2 ruote fisse:** Buona manovrabilità e trazione, con costi e complessità moderate. Simile ad una configurazione di veicolo tradizionale.
4. **2 ruote motrici e sterzanti + 2 ruote caster:** Migliore manovrabilità se le attuazioni sono posizionate opportunamente, con riduzione dei costi e della complessità meccanica.

Dopo un'attenta valutazione, si è deciso di adottare la configurazione a 2 ruote motrici e sterzanti più 2 ruote caster, in quanto offre un buon equilibrio tra manovrabilità, trazione, costi e semplicità meccanica. Le ruote motrici e sterzanti sono state posizionate su una diagonale del veicolo, per massimizzare l'efficacia della sterzata e permettere manovre come rotazioni sul posto e traslazioni laterali. Le ruote caster, invece, sono state posizionate sull'altra diagonale per garantire stabilità e supporto al veicolo durante il movimento.

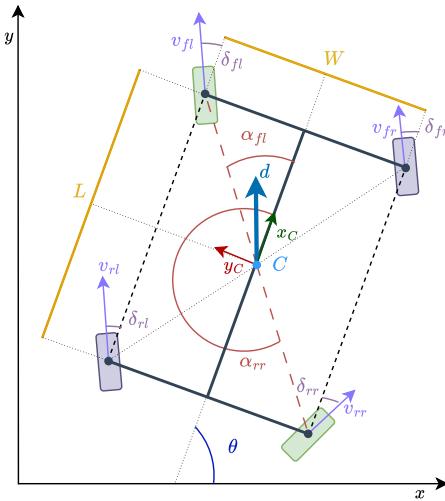


Figura 3.3: Schema della configurazione a 2 ruote motrici e sterzanti (in verde) e 2 ruote caster (in viola).

3.6 Selezione componenti

Sulla base delle specifiche tecniche calcolate, e della configurazione di ruote scelta, si è proceduto alla selezione dei componenti principali del veicolo.

3.6.1 Motori

Per gruppo motori, si è scelto di acquistare delle motoruote. Una motoruota integra in un unico componente il motore elettrico, la ruota stessa e il sistema di trasmissione, semplificando notevolmente la progettazione meccanica e riducendo i costi di assemblaggio. Infatti, possono essere montate direttamente sul telaio del veicolo, a patto di predisporre opportune staffe di supporto.

Il prodotto acquistato è la MRT05 di CFR, che combina inoltre un motore di sterzo posizionato verticalmente rispetto al piano della ruota, permettendo di ottenere la sterzata mediante un accoppiamento ad ingranaggi. Questo consente di ottenere un sistema di sterzo compatto e integrato, riducendo ulteriormente la complessità meccanica.



Figura 3.4: Render della motoruota MRT05 di CFR.

Tabella 3.1: Specifiche tecniche dei motori di trazione e sterzo

Parametro	Trazione	Sterzo	Unità
Tipo	BR Brushless	BR Brushless	-
Potenza (\$2 - 60 min)	500	300	W
Tensione batteria	48	48	V
Velocità motore	2300	2800	RPM
Frequenza	76	93	Hz
Coppia motore	2	1	Nm
Rapporto di riduzione	1:21	1:45.56	-
Coppia in uscita	37	34	Nm
Coppia max (acc./frenata)	180	-	Nm
Grado di protezione	IP65	IP65	-
Lubrificazione	Grasso	Grasso	-
Codice motore PMAC	BD 090 - 50 - 4	BD 090 - 25 - 4	-

Tabella 3.2: Peso complessivo del gruppo ruota motrice

Componente	Valore	Unità
Peso totale gruppo ruota	42	kg

3.6.2 Verifica dei Requisiti di Trazione

Verifichiamo ora che i motori selezionati soddisfino i requisiti di coppia e potenza calcolati in precedenza.

Requisiti di trazione:

- In piano: coppia totale richiesta $\tau_{richiesta} = 62.73 \text{ Nm}$, potenza $P_{richiesta} = 627.3 \text{ W}$
- Su rampa 10%: coppia totale richiesta $\tau_{richiesta} = 159.97 \text{ Nm}$, potenza $P_{richiesta} = 1599.7 \text{ W}$

Caratteristiche dei motori:

- Coppia nominale per ruota: 37 Nm
- Coppia di picco per ruota: 180 Nm
- Potenza nominale per ruota (S2 - 60 min): 500 W

Verifica in piano: La coppia totale disponibile con 2 motoruote è:

$$\tau_{disponibile} = 2 \times \tau_{nominale} = 2 \times 37 = 74 \text{ Nm} \geq \tau_{richiesta} = 62.73 \text{ Nm} \quad \checkmark \quad (3.7)$$

La forza di trazione massima erogabile in condizioni nominali:

$$F_{trazione} = \frac{\tau_{disponibile}}{r} = \frac{74}{0.099} \approx 747 \text{ N} \geq F_{richiesta} = 627.3 \text{ N} \quad \checkmark \quad (3.8)$$

Margine di sicurezza in piano:

$$\text{Margine}_{\tau} = \frac{74 - 62.73}{62.73} \times 100 \approx 18\% \quad (3.9)$$

Verifica su rampa 10%: Nel caso peggiore (salita 10% con accelerazione $a = 0.33 \text{ m/s}^2$), la forza richiesta è:

$$F_{richiesta} = m \cdot g \cdot \sin(\theta) + \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\theta) + m \cdot a = 976 + 293 + 333 = 1602 \text{ N} \quad (3.10)$$

La coppia corrispondente:

$$\tau_{richiesta} = F_{richiesta} \cdot r = 1602 \times 0.099 \approx 159 \text{ Nm} \quad (3.11)$$

Questa condizione supera la coppia nominale ma rientra ampiamente nella coppia di picco disponibile:

$$\tau_{picco} = 2 \times 180 = 360 \text{ Nm} \gg \tau_{richiesta} = 159 \text{ Nm} \quad \checkmark \quad (3.12)$$

La durata della rampa è:

$$t_{rampa} = \frac{L}{v} = \frac{3}{1} = 3 \text{ s} \ll t_{picco,max} \quad (3.13)$$

Conclusione: I motori selezionati sono adeguati per operazioni in piano con un margine di sicurezza del 18%, e possono gestire rampe fino al 10% utilizzando la coppia di picco per brevi periodi (3 secondi), ben al di sotto del limite temporale consentito.

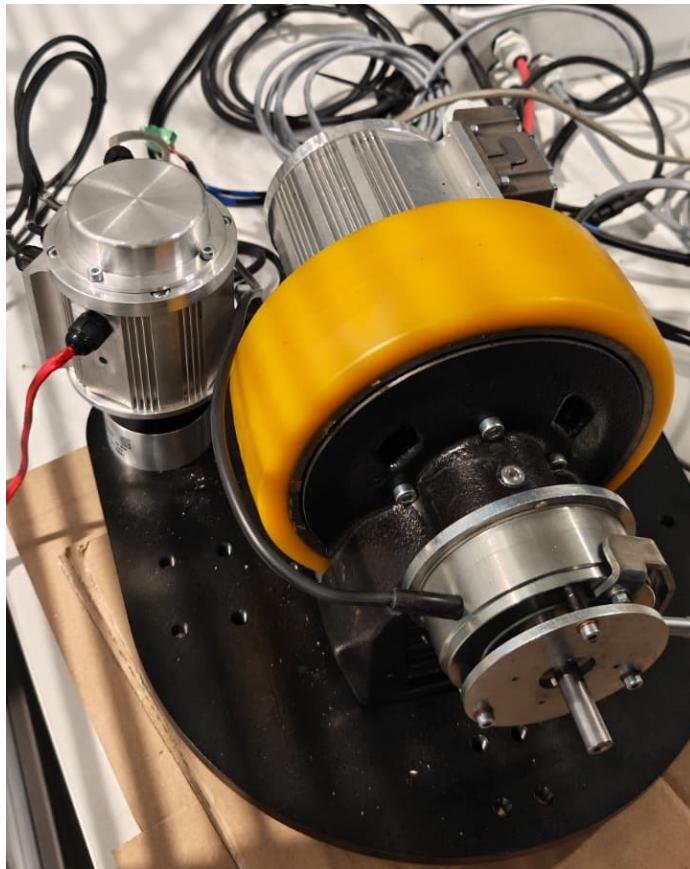


Figura 3.5: Foto reale della motoruota MRT05 di CFR su un banco di prova. Si possono notare i due motori e la piastra di supporto.

3.6.3 Batteria

Per l'alimentazione del veicolo, si è scelto di utilizzare una batteria con tecnologia LiFePO₄ (Litio-Ferro-Fosfato). Questa tecnologia offre numerosi vantaggi, tra cui:

- **Sicurezza:** Le batterie LiFePO₄ sono più stabili termicamente e chimicamente rispetto ad altre tecnologie al litio, riducendo il rischio di incendi o esplosioni.
- **Durata:** Le batterie LiFePO₄ hanno una vita utile più lunga, con un numero maggiore di cicli di carica/scarica rispetto ad altre tecnologie.
- **Prestazioni:** Le batterie LiFePO₄ offrono buone prestazioni in termini di capacità di scarica ad alta corrente, rendendole adatte per applicazioni che richiedono picchi di potenza.

Su queste basi, la ricerca del fornitore per tale componente si è concentrata su aziende che operassero nel campo dei veicoli elettrici. Dopo un'attenta valutazione, si è deciso di affidarsi a *FlashBattery*, un'azienda italiana specializzata nel settore, che offre soluzioni dotate di sistemi di gestione della batteria (BMS) avanzati con comunicazione in CANOpen. Sulle base delle specifiche



Figura 3.6: Foto del pacco batteria (rosso) e del caricabatterie (nero) forniti da FlashBattery, alloggiate su un carrello di prova.

tecniche calcolate in precedenza, il fornitore ha proposto una batteria con le seguenti caratteristiche:

3.6.4 Verifica dei Requisiti Energetici

Confrontiamo ora i requisiti energetici calcolati in precedenza con le caratteristiche della batteria selezionata.

Requisito energetico: Era stato calcolato un fabbisogno di almeno 4 kWh per garantire 4 ore di autonomia operativa con una potenza media stimata di 1 kW.

Caratteristiche della batteria:

- Energia totale: 5.38 kWh
- Energia disponibile (80% DOD): 4.30 kWh

Verifica della capacità energetica:

$$E_{disponibile} = 4.30 \text{ kWh} \geq E_{richiesta} = 4 \text{ kWh} \quad \checkmark \quad (3.14)$$

Tabella 3.3: Specifiche tecniche della batteria LiFePO4

Parametro	Valore	Unità
Tensione nominale	51.2	V
Capacità nominale	105	Ah
Chimica	LiFePO4	-
Tensione massima	59.2	V
Tensione minima	44	V
Corrente di scarica	105 (continua)	A
Corrente di scarica picco ($t \leq 60s$)	210	A
Corrente di carica massima	50	A
Profondità di scarica (DOD)	80	%
Tensione di rigenerazione massima	56	V
Corrente di rigenerazione massima	210	A
Energia totale	5.38	kWh
Energia disponibile (80% DOD)	4.30	kWh
Temperatura operativa	-10 / +45	°C
Auto-scarica (@25°C)	3 / mese	%
Auto-scarica (@50°C)	18 / mese	%

Tabella 3.4: Specifiche meccaniche della batteria

Parametro	Valore	Unità
Lunghezza	510	mm
Larghezza	320	mm
Altezza	275	mm
Peso stimato	55	kg
Materiale	Acciaio al carbonio	-
Finitura esterna	RAL 3002 (rosso)	-
Grado di protezione	IP65	-

La batteria soddisfa il requisito minimo con un margine di sicurezza del:

$$\text{Margine} = \frac{E_{\text{disponibile}} - E_{\text{richiesta}}}{E_{\text{richiesta}}} \times 100 = \frac{4.30 - 4}{4} \times 100 = 7.5\% \quad (3.15)$$

Verifica della corrente di scarica: La potenza massima richiesta in condizioni critiche (rampa 10%) è $P_{\text{max}} = 1.6 \text{ kW}$. La corrente corrispondente alla tensione nominale è:

$$I_{\text{richiesta}} = \frac{P_{\text{max}}}{V_{\text{nominale}}} = \frac{1600}{51.2} \approx 31.25 \text{ A} \quad (3.16)$$

La batteria fornisce:

- Corrente continua: 105 A $\gg 31.25 \text{ A} \checkmark$
- Corrente di picco ($t \leq 60s$): 210 A \checkmark

Conclusione: La batteria selezionata è adeguata ai requisiti del veicolo, offrendo capacità energetica sufficiente per l'autonomia richiesta e correnti di scarica ampiamente superiori alle necessità operative, garantendo così un margine di sicurezza per eventuali picchi di potenza o inefficienze del sistema.

3.6.5 Driver per Motori Elettrici

Per il controllo di basso livello dei motori PMAC integrati nelle motoruote, si è deciso di utilizzare degli inverter compatibili con le specifiche dei motori stessi, ovvero:

- Tensione di alimentazione: 48V
- Potenza nominale: almeno 500W per i motori di trazione e 300W per i motori di sterzo
- Supporto per protocollo di comunicazione CANOpen.

Dopo una ricerca tra i possibili fornitori¹, si è scelto di accettare la proposta offerta da **MicroPhase**, un’azienda italiana specializzata in azionamenti per motori elettrici. Il modello da loro selezionato è il *Mini-Traction Power* che sod-



Figura 3.7: Inverter Mini-Traction Power di MicroPhase, utilizzato per il controllo dei motori PMAC delle motoruote.

disfa tutti i requisiti richiesti. Difatti, tali driver **implementano completamente** i protocolli CiA 301 e 402 per la definizione degli oggetti e della macchina a stati finiti per il controllo dei motori.

Inoltre, l’azienda ha offerto supporto tecnico per:

- Configurazione dei driver per l’uso specifico con i motori CFR e gli encoder S/N/COS da loro integrati.
- Taratura dei PID per il controllo di basso livello delle fasi di corrente dei motori.

3.6.6 Computer di Bordo

Per il computer di bordo, si è scelto il *LattePanda Sigma*, un Single Board Computer (SBC) basato su architettura x86 che offre prestazioni eccezionali in un formato compatto. Questo dispositivo è equipaggiato con un processore Intel® Core™ i5-1340P di 13^a generazione (Raptor Lake), caratterizzato da 12 core (4 Performance-core + 8 Efficient-core) e 16 thread, con frequenza turbo fino a 4.6 GHz per i core ad alte prestazioni e 3.4 GHz per quelli efficienti.

La scelta di questo SBC è stata motivata da diversi fattori chiave:

¹Tale ricerca è stata necessaria in quanto CFR **non produce** inverter.

Tabella 3.5: Specifiche tecniche dell'inverter Mini-Traction Power (Modello 48V)

Parametro	Valore	Unità
Tensione nominale	48	V
Tensione minima	20	V
Tensione massima ammessa	80	V
Corrente di boost (5s)	120 @ 5s	A
Corrente di picco (2 min)	100 @ 2min	A
Corrente nominale	75	A
Potenza nominale di uscita	3.6	kW
Frequenza PWM	20	kHz
Temperatura di esercizio	0 / +40	°C
Temperatura di stoccaggio	-10 / +70	°C
Uscita ausiliaria 5V	5 (max 200 mA)	V
Banda di corrente	2	kHz
Banda di velocità	150	Hz
Induttanza minima motore	200	µH
Peso	0.5	kg
Grado di contaminazione	2° o superiore	-
Altitudine	0-1000m / 1000-2000m	m
Infiammabilità 94V-0	Conforme	-

- **Architettura x86:** Garantisce compatibilità nativa con ROS2 e una vasta gamma di software e librerie di robotica, semplificando lo sviluppo e il debug.
- **Potenza di calcolo:** Il processore i5-1340P offre prestazioni elevate per eseguire algoritmi di navigazione, localizzazione e controllo in tempo reale, con una potenza base di 28W (configurabile fino a 45W).
- **Memoria veloce:** Dotato di 16GB di RAM LPDDR5-6400 dual-channel, con una banda passante di 102.4 GB/s, permette l'elaborazione simultanea di dati provenienti dai sensori e l'esecuzione di algoritmi complessi.
- **GPU integrata:** Intel® Iris® Xe Graphics con 80 unità di esecuzione, utile per eventuali elaborazioni grafiche o visualizzazioni.
- **Connattività industriale:** Include interfacce essenziali per applicazioni robotiche:
 - 2 porte Ethernet 2.5GbE (Intel® i225-V) per comunicazioni di rete affidabili
 - Porte USB (2x USB2.0, 2x USB3.2 Gen2, 2x Thunderbolt™ 4) per collegare adattatori CAN-USB e altri dispositivi
 - Porta COM con supporto nativo per protocolli industriali RS232/RS485
 - Header GPIO a 34 pin con co-processore ATmega32U4 per interfacciamento I/O
- **Espandibilità:** Slot M.2 per storage NVMe ad alte prestazioni e moduli wireless, permettendo l'installazione di SSD per logging dei dati e moduli WiFi/4G per comunicazioni remote.



Figura 3.8: LattePanda Sigma Single Board Computer con processore Intel Core i5-1340P.

- **Supporto multi-OS:** Compatibile con Windows, Ubuntu e altre distribuzioni Linux, Proxmox VE, permettendo la scelta del sistema operativo più adatto. Per il progetto è stato scelto Ubuntu 24.04 LTS con ROS2 Jazzy Jalisco.
- **Formato compatto:** Form factor 3.5" (146 × 102 mm), facilmente integrabile nel telaio del robot.
- **Gestione energetica:** Alimentazione flessibile tramite DC Jack (12-20V) o USB Type-C PD (20V), con funzioni BIOS avanzate tra cui Auto Power-on e Watchdog Timer, essenziali per applicazioni autonome.

Tabella 3.6: Specifiche tecniche principali del LattePanda Sigma

Parametro	Valore	Unità
Processore	Intel Core i5-1340P	-
Core / Thread	12C (4P+8E) / 16T	-
Frequenza massima	4.6 (P-core), 3.4 (E-core)	GHz
Cache L2	12	MB
Potenza base (TDP)	28 (default: 45W)	W
GPU	Intel Iris Xe Graphics (80 EU)	-
Frequenza GPU	1.45	GHz
RAM	16 GB LPDDR5-6400 Dual-Channel	GB
Banda passante memoria	102.4	GB/s
Ethernet	2 × 2.5GbE (Intel i225-V)	-
USB	2×USB2.0, 2×USB3.2, 2×TB4	-
Storage	M.2 NVMe PCIe 4.0 x4	-
Display	HDMI 2.1, 2×USB-C DP, eDP	-
Dimensioni	146 × 102	mm
Temperatura operativa	0 / +45	°C

Questa piattaforma hardware fornisce le risorse computazionali necessarie per eseguire l'intero stack software del robot, includendo la gestione dei sensori, la localizzazione, la pianificazione del percorso e il controllo dei motori, mantenendo al contempo un profilo energetico compatibile con l'alimentazione a batteria del veicolo.

3.7 Sensoristica

Analizziamo ora l'insieme della sensoristica a disposizione e/o scelta per il veicolo.

3.7.1 LiDAR

Il sensore LiDAR scelto per il progetto è il *Livox Mid-360*, un dispositivo di scansione 3D prodotto da Livox Technology che offre un eccellente compromesso tra prestazioni, costo e facilità di integrazione. Questo sensore utilizza un pattern di scansione non ripetitivo proprietario di Livox, che garantisce una copertura più uniforme dell'ambiente rispetto ai LiDAR tradizionali a scansione meccanica.

La scelta di questo sensore è stata motivata da diverse caratteristiche chiave:

- **Campo visivo esteso:** 360° in orizzontale e 59° in verticale (-7° a $+52^\circ$), permettendo una copertura quasi completa dell'ambiente circostante il veicolo, essenziale per la navigazione autonoma e il rilevamento di ostacoli.
- **Portata adeguata:** Fino a 70 m per superfici con riflettività dell'80%, ampiamente sufficiente per l'ambiente industriale interno ed esterno dello stabilimento.
- **Alta frequenza di acquisizione:** 200.000 punti/secondo con frame rate di 10 Hz, fornendo una densità di punti adeguata per algoritmi di SLAM e mappatura in tempo reale.
- **IMU integrata:** Dotato di IMU a 6 assi (modello ICM40609) che fornisce dati di accelerazione e velocità angolare, fondamentali per la fusione sensoriale con gli algoritmi di localizzazione come FAST-LIO2.
- **Sincronizzazione precisa:** Supporto per IEEE 1588-2008 (PTPv2) e GPS per la sincronizzazione temporale, utile per la fusione multi-sensoriale.
- **Interfaccia Ethernet:** Comunicazione tramite Ethernet 100BASE-TX, facilmente integrabile con il computer di bordo e compatibile con ROS2.
- **Compattezza e leggerezza:** Dimensioni ridotte (65x65x60 mm) e peso contenuto (265 g) facilitano l'integrazione meccanica sul veicolo.
- **Robustezza:** Grado di protezione IP67, adatto per operazioni in ambiente industriale e all'aperto.
- **Basso consumo:** Potenza media di 6.5 W, compatibile con l'alimentazione a batteria del veicolo.



Figura 3.9: Sensore LiDAR Livox Mid-360.

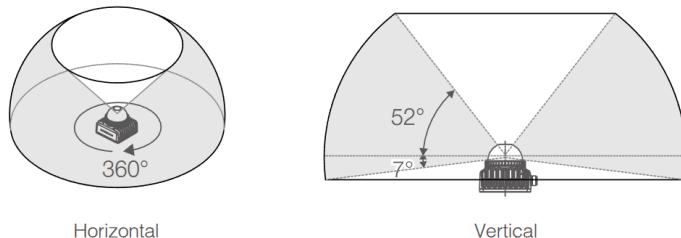


Figura 3.10: Campo visivo del LiDAR Livox Mid-360: 360° orizzontale e 59° verticale (-7° a $+52^\circ$).

Supporto Software

Il Livox Mid-360 dispone di un ecosistema software completo sviluppato e mantenuto da Livox Technology, che facilita l'integrazione del sensore in applicazioni robotiche:

Livox SDK2: È la libreria di base scritta in C/C++ che implementa il protocollo di comunicazione proprietario di Livox. L'SDK fornisce:

- API C-style per il controllo del LiDAR e la ricezione dei dati
- Supporto multi-piattaforma (Linux e Windows)
- Gestione di configurazioni multi-sensore e multi-host
- Sincronizzazione temporale tramite IEEE 1588 (PTP) e GPS
- Logging dei dati del firmware per diagnostica
- Modalità master/slave per scenari multi-casting

Livox ROS Driver 2: È il driver ufficiale per l'integrazione con ROS e ROS2, sviluppato sopra l'SDK2. Supporta:

- ROS Melodic e Noetic (ROS1)
- ROS2 Foxy e Humble. Jazzy non è ancora ufficialmente supportato, ma il driver per Humble funziona correttamente anche su questa versione.

Tabella 3.7: Specifiche tecniche del LiDAR Livox Mid-360

Parametro	Valore	Unità
Modello	Mid-360	-
Lunghezza d'onda laser	905	nm
Classe di sicurezza laser	Class 1 (IEC60825-1:2014)	-
Portata di rilevamento (@ 100 klx)	40 @ 10% rifl., 70 @ 80% rifl.	m
Zona cieca prossimale	0.1	m
Campo visivo orizzontale	360	°
Campo visivo verticale	-7 a +52 (59° totale)	°
Precisione della distanza (1σ @ 10m)	≤ 2	cm
Precisione della distanza (1σ @ 0.2m)	≤ 3	cm
Precisione angolare (1σ)	< 0.15	°
Frequenza punti	200,000 (first return)	pts/s
Frame rate	10 (tipico)	Hz
Porta dati	Ethernet 100BASE-TX	-
Sincronizzazione	IEEE 1588-2008, GPS	-
Tasso falsi allarmi (@ 100 klx)	< 0.01	%
IMU integrata	ICM40609 (6 assi)	-
Temperatura operativa	-20 / +55	°C
Grado di protezione	IP67	-
Potenza media	6.5	W
Tensione di alimentazione	9 - 27	V DC
Dimensioni	65 x 65 x 60	mm
Peso	265	g

- Pubblicazione dati in formati multipli:
 - PointCloud2 standard (sensor_msgs/PointCloud2)
 - Formato personalizzato Livox con timestamp per punto
 - Formato PCL (pcl::PointXYZI)
- Configurazione tramite file JSON per parametri di rete, modalità di scansione e calibrazione estrinseca
- Pubblicazione separata di dati IMU integrati
- Supporto per topic multipli (un topic per LiDAR o topic condiviso)
- Frequenza di pubblicazione configurabile (fino a 100 Hz)

Per il progetto è stata utilizzata la versione ROS2 Humble del driver, che permette l'integrazione diretta con l'architettura software del robot. Il sensore è inoltre supportato nativamente da FAST-LIO2, l'algoritmo di SLAM scelto per il progetto, garantendo prestazioni ottimali per la localizzazione e la mappatura in tempo reale. La compatibilità nativa con FAST-LIO2 deriva dal fatto che il formato dati personalizzato di Livox, che fornisce un timestamp per ogni singolo punto anziché per frame, è particolarmente adatto agli algoritmi di SLAM basati su odometria LiDAR-inerziale.

Nota: Il cono cieco del sensore implica che ci sono dei limiti nella copertura verticale che il sensore può offrire. Questo implica che è impor-

tante il punto di montaggio del sensore sul veicolo per massimizzare l'area coperta e minimizzare le zone non visibili in funzione delle operazioni previste.

Nel progetto, il sensore è stato montato frontalmente e rivolto verso il basso, in modo da coprire efficacemente l'area immediatamente davanti e circostante il veicolo.

3.7.2 Encoder

Gli encoder per il controllo della velocità e della posizione angolare sono componenti integrati di fabbrica nelle motoruote MRT05 fornite da CFR. Si tratta di encoder magnetici angolari di tipo SIN/COS modello **FTS1** prodotti da COBO Spa, progettati specificamente per applicazioni "through-shaft" (albero passante).

Questa tecnologia utilizza un anello magnetico permanente polarizzato diametralmente montato sull'albero rotante del motore. Il sensore FTS1 rileva la distribuzione del campo magnetico attraverso una combinazione brevettata di sensori Hall allo stato solido e algoritmi di elaborazione digitale del segnale. Le uscite sinusoidali (SIN) e cosinusoidali (COS) variano in funzione della posizione angolare del magnete, fornendo informazioni precise sulla rotazione.

Caratteristiche principali:

- **Tecnologia contactless:** Assenza di usura meccanica e manutenzione, ideale per ambienti industriali severi
- **Uscite multiple programmabili:**
 - Segnali analogici SIN/COS con ampiezze configurabili (1.0, 1.1, 2.2 o 4 Vpp)
 - Uscita analogica 0.5-4.5 Vdc per posizione assoluta
 - Encoder incrementale ABZ con 1024 conteggi per giro
 - Uscite UVW per motori brushless
 - Interfaccia SPI per dati digitali a 12 bit
- **Risoluzione:** 10-bit assoluta, 12-bit tramite SPI, interpolabile fino a 1024 PPR in modalità incrementale
- **Latenza ridotta:** Tipicamente 12 μ s (high bandwidth) o 75 μ s (low bandwidth)
- **Non linearità integrale:** $\pm 0.6^\circ$ con magnete ideale e calibrazione
- **Velocità rotazionale:** Fino a 25000 rpm (prestazioni ottimali fino a 10000 rpm)
- **Funzioni avanzate:**
 - Auto-calibrazione per compensazione offset e gain
 - Funzione ZERO programmabile
 - Emulazione fino a 16 poli per uscite SIN/COS

- Robustezza:** Resistenza a vibrazioni (20g, 10-2000 Hz) e shock (50g, 11ms), grado di protezione IP67
- Range di temperatura:** -40°C a +125°C (uscite SIN/COS, SPI, ABZ, UVW @ 5V)
- Alimentazione flessibile:** 5 Vdc o 9-36 Vdc

Tabella 3.8: Specifiche tecniche dell'encoder magnetico FTS1

Parametro	Valore	Unità
Modello	FTS1 (COBO Spa)	-
Tipo	Magnetico angolare through-shaft	-
Tecnologia sensori	Hall allo stato solido	-
Risoluzione assoluta	10 bit	-
Risoluzione SPI	12 bit	-
Risoluzione incrementale	1024	PPR
Uscite SIN/COS	1.0, 1.1, 2.2, 4 (prog.)	Vpp
Uscita analogica	0.5 - 4.5	Vdc
Non linearità integrale	± 0.6 (calibrato)	°
Latenza (high bandwidth)	12	μs
Latenza (low bandwidth)	75	μs
Velocità massima	25000	rpm
Velocità ottimale	< 10000	rpm
Tensione alimentazione	5 o 9-36	Vdc
Temperatura operativa	-40 / +125	°C
Resistenza vibrazioni	20g (10-2000 Hz)	-
Resistenza shock	50g (11 ms)	-
Grado di protezione	IP67	-
Materiale involucro	PBT	-

Nel sistema del robot, gli encoder FTS1 sono collegati direttamente ai driver Mini-Traction Power, ai quali forniscono feedback di posizione angolare e velocità tramite i segnali SIN/COS analogici. I driver eseguono l'interpolazione dei segnali per implementare il controllo in anello chiuso della posizione e della velocità dei motori, garantendo precisione e reattività nella risposta ai comandi. I dati di encoder sono inoltre accessibili dal computer di bordo tramite il bus CAN per il calcolo dell'odometria delle ruote, contribuendo alla stima della posizione del veicolo insieme ai dati del LiDAR e dell'IMU.

3.7.3 Sonda di Temperatura

Le sonde di temperatura integrate nelle motoruote MRT05 sono sensori resistivi (RTD) modello **STS1** prodotti da Microtherm GmbH, forniti di serie da CFR per il monitoraggio termico dei motori. Si tratta di sensori con caratteristiche simili al classico KTY84, ma con prestazioni migliorate.

Il principio di funzionamento si basa sulla variazione della resistenza elettrica di un elemento sensibile in funzione della temperatura. Il sensore fornisce una curva resistenza-temperatura ben definita e ripetibile, permettendo una misurazione precisa attraverso la lettura della resistenza con un circuito di condizionamento appropriato.

Caratteristiche principali:

- **Range di temperatura esteso:** Da -40°C a +170°C (fino a +190°C con possibile perdita di linearità)
- **Resistenza nominale:** 1000 Ω a 100°C ($\pm 3\%$)
- **Eccellente stabilità termica a lungo termine:** Garantisce misurazioni affidabili nel tempo
- **Alta precisione:** Curve resistenza-temperatura con tolleranze ben definite
- **Nessuna polarità:** Non richiede attenzione alla connessione (+/-)
- **Isolamento elevato:** Resistenza di isolamento minima di 100 MΩ a 100 Vdc
- **Basso assorbimento:** Corrente nominale 5 mA, massima 8 mA
- **Potenza dissipata ridotta:** Massimo 50 mW
- **Robustezza meccanica:** Disponibile con involucro in PPS o guaina termorestringente in Kynar®
- **Compatibilità RoHS:** Conformità alle normative ambientali

Tabella 3.9: Specifiche tecniche della sonda di temperatura STS1

Parametro	Valore	Unità
Modello	STS1 (Microtherm)	-
Tipo	RTD (resistivo)	-
Resistenza tipica @ 100°C	1000	Ω
Tolleranza resistenza	± 3	%
Range temperatura operativa	-40 / +170	°C
Range esteso	-40 / +190	°C
Resistenza @ -40°C (tip.)	359	Ω
Resistenza @ 0°C (tip.)	498	Ω
Resistenza @ +25°C (tip.)	626	Ω
Resistenza @ +100°C (tip.)	1000	Ω
Resistenza @ +170°C (tip.)	1482	Ω
Resistenza isolamento (min.)	100 @ 100 Vdc	MΩ
Corrente nominale	5	mA
Corrente massima	8	mA
Potenza dissipata massima	50	mW
Materiale involucro	PPS / Kynar®	-
Tipo cavi	ETFE, AWG24	-
Conformità	RoHS	-

Nel sistema del robot, le sonde STS1 sono collegate ai driver Mini-Traction Power, che monitorano costantemente la temperatura dei motori per prevenire danni da surriscaldamento. I driver implementano protezioni termiche automatiche, riducendo la potenza erogata o arrestando il motore qualora la temperatura superi soglie critiche. I dati di temperatura sono accessibili anche dal computer di bordo tramite il bus CAN, permettendo la supervisione termica in tempo reale dell'intero sistema e l'implementazione di strategie di gestione termica a livello di veicolo (ad esempio, limitazione della velocità massima in condizioni di alta temperatura ambiente).

Bibliografia

- [1] Road vehicles — controller area network (can) — part 1: Data link layer and physical signalling. Standard ISO 11898-1:2015, International Organization for Standardization, 2015.
- [2] Industrial communication networks — fieldbus specifications — part 3-12: Data-link layer service definition — type 12 elements (ethercat). Standard IEC 61158-3-12, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [3] Industrial communication networks — fieldbus specifications — part 6-10: Application layer protocol specification — type 10 elements (profinet). Standard IEC 61158-6-10, International Electrotechnical Commission, 2019.
- [4] Johann Borenstein and Yoram Koren. The vector field histogram—fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3):278–288, 1991.
- [5] CAN in Automation (CiA). *CANopen Device Profile for Drives and Motion Control*, 2002.
- [6] CAN in Automation (CiA). *CANopen Application Layer and Communication Profile*, 2011. Version 4.2.0.
- [7] Edsger W. Dijkstra. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1):269–271, 1959.
- [8] Hugh Durrant-Whyte and Tim Bailey. Simultaneous localization and mapping: Part i. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 13(2):99–110, 2006.
- [9] Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. In *IEEE Robotics & Automation Magazine*, volume 4, pages 23–33, 1997.
- [10] Giorgio Grisetti, Rainer Kümmerle, Cyrill Stachniss, and Wolfram Burgard. A tutorial on graph-based slam. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(4):31–43, 2010.
- [11] Peter E. Hart, Nils J. Nilsson, and Bertram Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2):100–107, 1968.
- [12] Oussama Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1):90–98, 1986.
- [13] Steven M. LaValle. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning. In *Technical Report, Computer Science Department, Iowa State University*, 1998.

- [14] Modbus Organization. *Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b*, 2006.
- [15] Modbus Organization. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*, 2012.
- [16] Sebastian Thrun, Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Frank Dellaert. Robust monte carlo localization for mobile robots. *Artificial Intelligence*, 128(1-2):99–141, 2001.
- [17] Wei Xu, Yixi Cai, Dongjiao He, Jiarong Lin, and Fu Zhang. Fast-llo2: Fast direct lidar-inertial odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(4):2053–2073, 2022.