

UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

Stabilizzazione dell'Assetto e Controllo di Yaw Rate per una Bicicletta Elettrica Autonoma

Attitude Stabilization and Yaw Rate Control for an Autonomous Electric Bicycle

Candidato:
Emanuele Felicetti

Relatore:
Prof. Andrea Bonci

Correlatore:
Dott. Alessandro Di Biase

Anno Accademico 2025-2026

Università Politecnica delle Marche
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Informatica e dell'Automazione
Via Brecce Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Sommario

Il presente lavoro di tesi affronta la progettazione, lo sviluppo firmware embedded e la validazione sperimentale di un'architettura di controllo gerarchica per la stabilizzazione dell'assetto e la regolazione della velocità di imbardata (*yaw rate*) di un prototipo di bicicletta elettrica autonoma. Il sistema di controllo, implementato in linguaggio C sul core Cortex-M4 del microcontrollore STM32H745ZI con ciclo periodico a 100 Hz ($T_s = 10\,\text{ms}$), si articola su tre regolatori attivi: due anelli in cascata per lo sterzo (un regolatore proporzionale esterno di velocità di imbardata che genera il riferimento di rollio e un regolatore interno PD di rollio con comando diretto in tensione e protezione termica da sovracorrente tramite sensore ACS712) affiancati da un anello PI per la regolazione della velocità longitudinale provvisto di Feed-Forward e Anti-Windup con Back-Calculation. Sul prototipo in esame, il pilotaggio diretto in tensione del motore di sterzo ha permesso di evitare i ritardi di fase introdotti dai filtri sugli anelli di corrente sperimentati in lavori precedenti. La comunicazione con l'unità superiore avviene tramite protocollo seriale binario a 921 600 baud conforme allo standard BFMC con validazione CRC32. Le prove sperimentali a terra dimostrano il corretto inseguimento dei riferimenti di velocità longitudinale (1.0, 1.5 e 2.0 m/s) e l'efficacia del regolatore PD interno nel mantenere l'equilibrio dinamico del rollio all'aperto tramite controsterzo attivo ($\text{RMS}(\phi) = 1.58°$ in solo rollio e 1.92° nel test a tre anelli a $v \approx 2.0\,\text{m/s}$). Al contempo, l'analisi quantitativa evidenzia prestazioni di regolazione insufficienti dell'anello esterno di yaw rate: a fronte di un riferimento nullo ($\dot{\psi}_{ref} = 0°/\text{s}$), la velocità di imbardata oscilla tra $-39.69°/\text{s}$ e $+15.69°/\text{s}$ con valore medio $-16.91°/\text{s}$ ($\text{RMS} = 22.49°/\text{s}$), determinando una progressiva deviazione curvilinea della traiettoria. Tale errore stazionario non dipende dall'assenza dell'*High-Level Controller* – poiché l'STM32 dispone già della misura IMU di $\dot{\psi}$ – ma deriva dalla ridotta autorità del guadagno proporzionale ($|K_{p,yaw}| = 0.015$), dall'assenza di azione integrale e dal mancato utilizzo della retroazione sull'angolo meccanico di sterzo δ (encoder presente ma non impiegato). L'integrazione dell'unità ad alto livello (NVIDIA Jetson) risponde invece alla distinta esigenza strutturale di stimare la posa globale (X, Y, ψ) e governare la traiettoria nel piano.

Abstract

This thesis addresses the design, embedded firmware development, and experimental validation of a hierarchical control architecture for attitude stabilization and yaw rate regulation of an autonomous electric bicycle prototype. The control system, implemented in C on the Cortex-M4 core of the STM32H745ZI microcontroller with a 100 Hz periodic loop ($T_s = 10\,\text{ms}$), consists of three active regulators: two cascaded steering loops (an outer proportional yaw rate controller generating the roll reference, and an inner PD roll regulator with direct voltage actuation and ACS712 thermal overcurrent protection) alongside a PI loop for longitudinal speed regulation equipped with Feed-Forward and Back-Calculation Anti-Windup. On the considered prototype, direct voltage actuation of the steering motor avoided the phase lag introduced by the filtered current loops tested in previous works. Communication with the supervision unit is handled via a binary serial protocol at 921 600 baud compliant with BFMC standards and protected by CRC32 validation. Ground tests under full vehicle weight confirm accurate longitudinal speed tracking (1.0, 1.5, and 2.0 m/s), while outdoor tests demonstrate the effectiveness of the inner PD regulator in maintaining dynamic roll balance through active counter-steering (achieving a roll RMS of 1.58° in roll-only tests and 1.92° in the three-loop test at $v \approx 2.0\,\text{m/s}$). Concurrently, quantitative evaluation highlights insufficient regulation performance of the outer yaw rate loop: with a zero reference ($\dot{\psi}_{ref} = 0°/\text{s}$), the yaw rate fluctuates between $-39.69°/\text{s}$ and $+15.69°/\text{s}$ with a mean of $-16.91°/\text{s}$ (RMS = $22.49°/\text{s}$), resulting in a progressive curvilinear deviation of the trajectory. Since the microcontroller already measures $\dot{\psi}$ via the onboard IMU, this steady-state error is not a consequence of the absence of the High-Level Controller, but stems from the low proportional gain ($|K_{p,yaw}| = 0.015$), the lack of integral action, and the unused feedback on the mechanical steering angle δ (the steering encoder is installed but was not employed). Conversely, integrating a High-Level Controller (NVIDIA Jetson) addresses the distinct structural requirement of estimating global pose (X, Y, ψ) and tracking a spatial trajectory.

Indice

1 Introduzione e Inquadramento del Progetto **1**

1.1 Contesto e Motivazioni 1
1.2 Origine del Lavoro, Attività Pregresse e Contributi della Tesi 1
1.3 Architettura di Sistema a Due Livelli 3

2 Piattaforma Sperimentale: Meccanica ed Elettronica di Bordo **5**

2.1 Panoramica del Veicolo 5
2.2 Gruppo Meccanico della Trazione Posteriore 6
2.3 Meccanica dello Sterzo e Cannotto 6
2.4 Unità di Elaborazione: STM32 NUCLEO-H745ZI-Q 6
2.5 Attuatori e Driver di Potenza 8
2.5.1 Motori DC MAXON DCX35L 8
2.5.2 Driver di Potenza Cytron MD10C R3 9
2.6 Sensori di Bordo 10
2.6.1 Unità di Misura Inerziale (IMU) Bosch BNO055 10
2.6.2 Encoder Ottico Incrementale Avago HEDL5540 10
2.6.3 Sensore di Corrente Allegro ACS712 11
2.7 Alimentazione e Gestione della Potenza 12

3 Modellazione Dinamica e Teoria del Controllo **14**

3.1 Convenzione e Misure di Assetto (Angoli di Eulero) 14
3.2 Dinamica del Rollio e Modello del Pendolo Inverso 14
3.3 Il Principio Fisico del Controsterzo (*Counter-Steering*) 16
3.4 Approcci al Controllo del Bilanciamento e Scelta del Regolatore PD 16
3.5 Architettura di Controllo Gerarchica 19
3.6 Algoritmo PID Discreto con Anti-Windup Back-Calculation 20
3.6.1 Formulazione Matematica del Controllore PID Discreto . . . 20
3.6.2 Anti-Windup con Metodo di Back-Calculation 20
3.6.3 Feed-Forward di Velocità per la Trazione 21

4 Architettura Software Embedded e Comunicazione **22**

4.1 Architettura del Firmware Embedded su STM32H745 22
4.1.1 Organizzazione Modulare del Codice 22
4.1.2 File di Configurazione Centralizzata: `vehicleConfig.h` . . . 23
4.2 Macchina a Stati del Controllore 23
4.2.1 Implementazione dell'Algoritmo PID in C 24

4.3 Logiche di Sicurezza Fail-Safe (Safety-Critical) 26
4.4 Protocollo Seriale Binario BFMC con CRC32 26
4.4.1 Struttura dei Pacchetti di Comando e Telemetria 26
4.4.2 Meccanismo di Sincronizzazione: Sliding Window su Ring Buffer 28
4.5 Interfaccia di Monitoraggio e Telemetria MATLAB 29

5 Identificazione del Modello e Taratura dei Regolatori 31
5.1 Identificazione del Modello per l'Anello di Rollio 31
5.1.1 Screening dei Modelli Lineari Classici (Attività Pregressa) . . 31
5.1.2 Il Modello Ibrido Fisico-Cinematico + NARX Polinomiale . . 32
5.1.3 Ruolo della Modellazione rispetto alla Sintesi e alla Taratura dei Regolatori 32
5.2 Compensazione Sperimentale dell'Offset di Rollio 33
5.2.1 Procedura Sperimentale di Identificazione dell'Offset 33
5.3 Taratura del Regolatore PD di Rollio 34
5.3.1 Scelta del Pilotaggio Diretto in Tensione 34
5.3.2 Accordo dei Guadagni Proporzionale e Derivativo 35
5.4 Taratura del Controllo di Trazione (Velocità) 36
5.5 Taratura dell'Anello Esterno di Yaw Rate 37
5.5.1 Taratura Conservativa dell'Anello di Imbardata e Limiti di Autorità 37

6 Risultati Sperimentali a Ciclo Chiuso 39
6.1 Metodologia Sperimentale e Ripartizione dei Test 39
6.2 Test 1: Validazione del Controllo di Trazione (Solo Trazione) 40
6.3 Test 2: Stabilizzazione dell'Assetto Laterale (Solo Rollio) 42
6.3.1 Dinamica Temporale e Risposta di Controsterzo 42
6.4 Test 3: Controllo Coordinato di Imbardata (Yaw Rate e Rollio) . . . 44
6.4.1 Campionamento a Bordo, Registrazione Telemetrica e Dinamica di Yaw Rate e Rollio 45
6.4.2 Ricostruzione Odometrica Qualitativa e Distinzione tra Controllo di Yaw Rate e Controllo della Traiettoria 47
6.5 Sintesi Quantitativa delle Prestazioni e Confronto Sperimentale . . . 49
6.5.1 Confronto tra Anello Esterno di Yaw Rate Disattivato e Attivo 50

7 Conclusioni e Sviluppi Futuri 53
7.1 Sintesi dei Risultati Raggiunti 53
7.2 Limitazioni dello Studio e della Validazione Sperimentale 54
7.3 Sviluppi Futuri 56

Elenco delle figure

1.1 Architettura gerarchica del sistema di controllo a due livelli per la bicicletta autonoma. 3

2.1 La bicicletta prototipale impiegata nelle prove sperimentali. 5
2.2 Scheda di sviluppo STM32 NUCLEO-H745ZI-Q impiegata per il controllo embedded di basso livello. 7
2.3 Motore in corrente continua MAXON DCX35L con riduttore epicicloidale integrato. 9
2.4 Driver di potenza a ponte-H Cytron MD10C R3. 9
2.5 Modulo sensore inerziale a 9 gradi di libertà Bosch BNO055. 10
2.6 Encoder ottico incrementale HEDL5540 installato sui motori del prototipo. 11
2.7 Modulo sensore di corrente ACS712 per il monitoraggio e la protezione termica dello sterzo. 12
2.8 Convertitore DC-DC Step-Down LM2596 per la stabilizzazione della tensione logica. 13

3.1 Architettura di controllo implementata: anello di velocità longitudinale (in alto) e cascata a due anelli per lo sterzo (in basso), con uscita del PD di rollio direttamente in tensione. 19

4.1 Diagramma degli stati del controllore di bordo implementato in `control.c`. 24
4.2 Pannello dell'interfaccia grafica MATLAB sviluppata per la supervisione telemetrica e il collaudo del prototipo. 30

6.1 Risposta del controllo di trazione per tre setpoint di velocità distinti (1.0 m/s, 1.5 m/s e 2.0 m/s) nelle prove di avanzamento a terra. A sinistra: inseguimento della velocità lineare misurata dall'encoder rispetto al riferimento; a destra: profilo di tensione erogato dal driver Cytron MD10C. 41
6.2 Il prototipo di bicicletta strumentata impiegato durante le sessioni sperimentali di collaudo dinamico all'aperto. 42

6.3 Dinamica temporale del controllo di bilanciamento laterale in configurazione "Solo Rollio": angolo di rollio calibrato ϕ (in alto), tensione di controsterzo V_{steer} (al centro) e corrente assorbita dal motore di sterzo (in basso). 44
6.4 Risposta dinamica sincronizzata del controllo coordinato di imbardata e rollio: velocità di imbardata $\dot{\psi}$ (in alto), angolo di rollio ϕ confrontato con il riferimento ϕ_{ref} generato dall'anello esterno (al centro) e tensione di comando dello sterzo V_{steer} (in basso). 47
6.5 Stima qualitativa della traiettoria nel piano orizzontale XY ottenuta mediante integrazione odometrica dei dati sperimentali nella finestra analizzata. 48

7.1 Schema concettuale della chiusura dell'anello di navigazione spaziale demandato all'High-Level Controller. 57

Elenco delle tabelle

2.1 Mappatura delle periferiche hardware dell'STM32H745 per il controllo della bicicletta. 8
2.2 Specifiche elettriche e parametri di clamping di sicurezza. 13

3.1 Confronto tra i principali approcci di controllo per il bilanciamento attivo in relazione alle caratteristiche del prototipo sperimentale. . . 18

4.1 Moduli software del firmware STM32 e relative responsabilità. 23
4.2 Struttura del pacchetto di comando RX (13 byte, frequenza 50 Hz). . 27
4.3 Struttura del pacchetto di telemetria TX (60 byte totali: 14 float da 4 byte + 1 CRC32 da 4 byte, frequenza 100 Hz). 28

5.1 Sintesi dei risultati dell'identificazione data-driven per l'anello di rollio derivati dal lavoro preliminare di laboratorio [1]. 31
5.2 Riepilogo delle convenzioni di segno per l'anello di bilanciamento laterale ($\phi_{ref} = 0°$). 35

6.1 Riepilogo quantitativo delle metriche sperimentali nei tre test di validazione a ciclo chiuso. 50
6.2 Confronto indicativo tra le prove di marcia con anello esterno di yaw rate disattivato (Test 2) e attivo (Test 3). 51

Capitolo 1

Introduzione e Inquadramento del Progetto

1.1 Contesto e Motivazioni

La mobilità autonoma rappresenta uno dei campi di ricerca di maggiore rilievo nell'ingegneria moderna. Sebbene i veicoli a quattro ruote abbiano ormai raggiunto un livello di maturità tale da consentire estese sperimentazioni su strade pubbliche e servizi commerciali di guida autonoma, i veicoli a due ruote – e in particolare le biciclette e le motociclette – presentano sfide di modellazione e controllo notevolmente più articolate.

A differenza delle automobili, la bicicletta è un sistema meccanico **intrinsecamente instabile** a basse e medie velocità: in assenza di un controllo attivo, il veicolo è soggetto a caduta laterale sotto l'effetto della gravità. Il mantenimento dell'equilibrio dinamico richiede l'applicazione continua del principio del *controsterzo* (*counter-steering*), secondo cui la ruota anteriore deve essere sterzata rapidamente nella direzione della caduta per generare una forza centripeta alla base di appoggio che riporti il baricentro sulla verticale. L'accoppiamento cinematico e dinamico tra l'angolo di rollio (inclinazione laterale), l'angolo di sterzo, la velocità di imbardata e la velocità longitudinale di avanzamento rende il sistema fortemente non lineare, soggetto a vincoli non olonomi e caratterizzato, in funzione del modello e del punto di funzionamento, da dinamiche a fase non minima [2, 3].

Il progetto si prefigge la realizzazione di una **bicicletta elettrica autonoma** (*self-balancing e-bike*) in grado di stabilizzarsi a partire da velocità moderate e di seguire riferimenti di guida generati da un'unità di navigazione superiore.

1.2 Origine del Lavoro, Attività Pregresse e Contributi della Tesi

Per comprendere con chiarezza il perimetro del lavoro svolto, è necessario distinguere le componenti hardware e modellistiche ereditate dalle attività precedenti rispetto ai contributi sviluppati specificamente nella presente tesi.

Attività pregresse ereditate. Il prototipo si inserisce in un filone di ricerca articolato in due fasi antecedenti:

- **Piattaforma meccanica ed elettronica di potenza** [4]: l'allestimento meccanico del telaio, il motoriduttore di sterzo, il motore di trazione, i ponti-H Cytron e il cablaggio dei sensori di bordo sono stati realizzati in precedenti lavori di tesi, nei quali erano stati inoltre sperimentati schemi di controllo basati su anelli di corrente con filtraggio passa-basso e di Kalman, risultati tuttavia instabili a causa dei ritardi di fase introdotti;
- **Acquisizione in anello aperto e identificazione NARX** [1]: nel precedente progetto di Laboratorio di Automazione è stata condotta una campagna di acquisizione telemetrica in anello aperto finalizzata all'identificazione *data-driven* della dinamica laterale, da cui è scaturito il modello ibrido cinematico-NARX richiamato nel Capitolo 5 e impiegato per valutazioni preliminari in simulazione numerica.

Contributi sviluppati nella presente tesi. A partire da tale base sperimentale, il presente lavoro di tesi si è concentrato sulla riprogettazione integrale dell'architettura di controllo a ciclo chiuso, sullo sviluppo del relativo firmware embedded e sulla validazione sperimentale del prototipo. Nello specifico, i contributi sviluppati riguardano:

1. **Integrazione dei Sensori di Trazione e Protezione Elettrica**: acquisizione in quadratura dell'encoder ottico sulla catena di trazione posteriore per abilitare la regolazione di velocità a ciclo chiuso, e interfacciamento del sensore ad effetto Hall ACS712 sul ramo del motore di sterzo per il monitoraggio della corrente assorbita e la protezione software da sovracorrente.
2. **Scelta e Progettazione del Sistema di Controllo Gerarchico**: inquadramento delle metodologie di stabilizzazione (Sezione 3.4) e definizione di un'architettura a tre anelli attivi: una cascata a due anelli per lo sterzo (regolazione proporzionale della velocità di imbardata $\rightarrow$ stabilizzazione PD dell'angolo di rollio con comando diretto in tensione) affiancata da un anello PI indipendente per la velocità longitudinale, provvisto di Feed-Forward e Anti-Windup con Back-Calculation.
3. **Sviluppo del Firmware Embedded su STM32H745**: implementazione ex novo in linguaggio C del firmware di controllo sul core ARM Cortex-M4 a 240 MHz del microcontrollore STM32H745ZI, strutturato su un ciclo periodico a 100 Hz ($T_s = 10$ ms) cadenzato da interrupt timer hardware, acquisizione sensoristica via I2C/timer in quadratura e macchina a stati fail-safe.
4. **Protocollo Seriale BFMC e Interfaccia MATLAB**: implementazione di un canale di comunicazione bidirezionale a 921 600 baud conforme allo standard

Bosch Future Mobility Challenge (BFMC) [5] con verifica CRC32, abbinato a una GUI MATLAB per la telemetria e la modifica a caldo dei guadagni.

5. **Taratura Sperimentale e Valutazione Quantitativa a Ciclo Chiuso**: definizione della procedura empirica per la compensazione dell'offset di rollio e per la taratura sperimentale dei tre regolatori; validazione delle prove di marcia all'aperto per la stabilizzazione del rollio e analisi quantitativa delle prestazioni e dei limiti dell'anello di yaw rate, distinguendo le problematiche di regolazione locale della velocità angolare da quelle di controllo della traiettoria cartesiana.

1.3 Architettura di Sistema a Due Livelli

Per consentire la futura integrazione con algoritmi avanzati di navigazione autonoma, localizzazione SLAM e pianificazione del percorso (Nav2), il sistema è progettato secondo una struttura gerarchica a due livelli (mostrata in Figura 1.1):

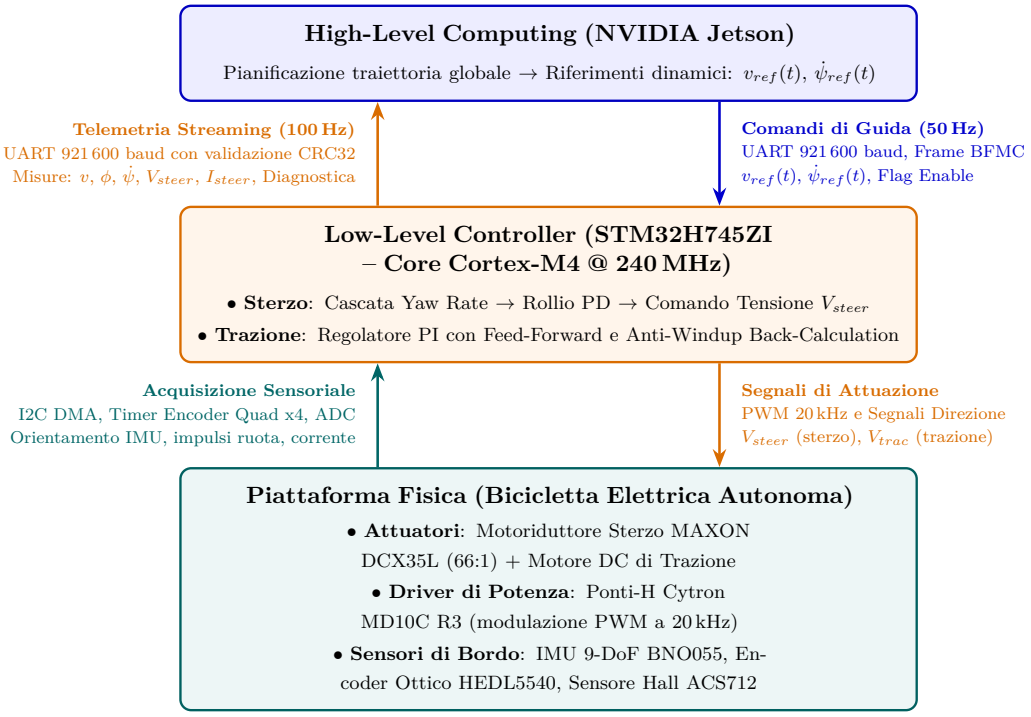


Figura 1.1: *Architettura gerarchica del sistema di controllo a due livelli per la bicicletta autonoma.*

La ripartizione funzionale tra i due livelli riflette una precisa necessità fisica e di controllo:

- **Il Low-Level Controller (STM32H745 Cortex-M4)** opera ad anello chiuso sulla dinamica interna del veicolo:
  - riceve dall'alto livello il riferimento di velocità di trazione (v_{ref}) e il riferimento di velocità di imbardata ($\dot{\psi}_{ref}$);

  - provvede al bilanciamento attivo del rollio tramite controsterzo, alla regolazione locale della velocità angolare di imbardata $\dot{\psi}$ (misurata dall'IMU di bordo) e al controllo della velocità longitudinale;
  - invia lo streaming telemetrico a 100 Hz all'unità superiore;
  - *non dispone tuttavia della stima della posa cartesiana globale* (X, Y, ψ) *né del percorso desiderato*: pertanto, anche qualora lo yaw rate fosse regolato localmente, il solo livello embedded non potrebbe correggere derive spaziali accumulate o inseguire una traiettoria geometrica assegnata nel piano.

- **L'High-Level System (NVIDIA Jetson / ROS 2)** gestisce la navigazione spaziale:
  - pianifica la traiettoria globale desiderata alla velocità richiesta;
  - riceve i dati telemetrici e ricostruisce la traiettoria reale mediante odometria e fusione sensoriale;
  - confronta la posizione reale con quella pianificata, calcolando l'errore laterale (*cross-track error*);
  - ricalcola istante per istante il nuovo riferimento di velocità di imbardata $\dot{\psi}_{ref}(t)$ necessario a ricondurre la bicicletta sulla rotta pianificata e lo invia ciclicamente al microcontrollore.

Durante la fase di sviluppo e collaudo oggetto di questa tesi, l'interfaccia grafica MATLAB ha svolto **solo parzialmente** le funzioni previste per la scheda NVIDIA Jetson: pur scambiando con l'STM32 i medesimi pacchetti seriali binari del protocollo BFMC (per l'invio dei comandi di abilitazione e di riferimenti costanti o a gradino v_{ref}, $\dot{\psi}_{ref}$, oltre alla ricezione della telemetria), essa non implementa infatti la pianificazione della traiettoria né la correzione in tempo reale (*live*) del riferimento di yaw rate sulla base dell'errore di posa.

Capitolo 2

Piattaforma Sperimentale: Meccanica ed Elettronica di Bordo

2.1 Panoramica del Veicolo

La piattaforma fisica oggetto di questo lavoro di tesi è una bicicletta elettrica commerciale (mostrata in Figura 2.1), profondamente modificata e riallestita per operare come veicolo autonomo robotizzato. Il sistema integra due attuatori in corrente continua – un motore per la trazione posteriore e un motore dedicato all'attuazione dello sterzo – governati da ponti-H dedicati, tre sensori (IMU a 9 assi, encoder ottico incrementale e sensore di corrente ad effetto Hall) e un'unità di calcolo embedded costituita da una scheda STM32 NUCLEO-H745ZI-Q.



Figura 2.1: *La bicicletta prototipale impiegata nelle prove sperimentali.*

2.2 Gruppo Meccanico della Trazione Posteriore

La propulsione del veicolo è demandata a un motore in corrente continua installato nella parte inferiore centrale del telaio, in corrispondenza dell'alloggiamento originariamente occupato dai pedali (movimento centrale). Il moto è trasferito alla ruota motrice posteriore mediante una riduzione meccanica accoppiata a una trasmissione a catena. L'elevato fattore di riduzione permette di sviluppare la forza di trazione necessaria allo spunto e a regime anche con correnti di alimentazione moderate, proteggendo il ponte-H da eccessivo surriscaldamento.

2.3 Meccanica dello Sterzo e Cannotto

L'attuazione dello sterzo rappresenta l'elemento più critico per il controllo dell'equilibrio. Il motore di sterzo agisce sul cannotto della forcella mediante un accoppiamento a ingranaggi rigido. A differenza dei veicoli a guida manuale, in cui il ciclista applica una coppia dolce e distribuita, il controllo automatico ad anello chiuso richiede brusche inversioni del verso di rotazione e forti coppie impulsive per generare il controsterzo reattivo. Queste sollecitazioni generano grandi sforzi torsionali sulla staffa di fissaggio del motore: durante la fase di sviluppo si è resa necessaria una revisione dell'ancoraggio strutturale tramite punti di vincolo supplementari per annullare qualsiasi gioco meccanico angolare parassita, che avrebbe introdotto ritardi di fase deleteri per la stabilità del rollio.

2.4 Unità di Elaborazione: STM32 NUCLEO-H745ZI-Q

Il controllo di basso livello è affidato alla scheda di sviluppo **STM32 NUCLEO-H745ZI-Q** (mostrata in Figura 2.2), equipaggiata con il microcontrollore dual-core **STM32H745ZI** [6] di STMicroelectronics.

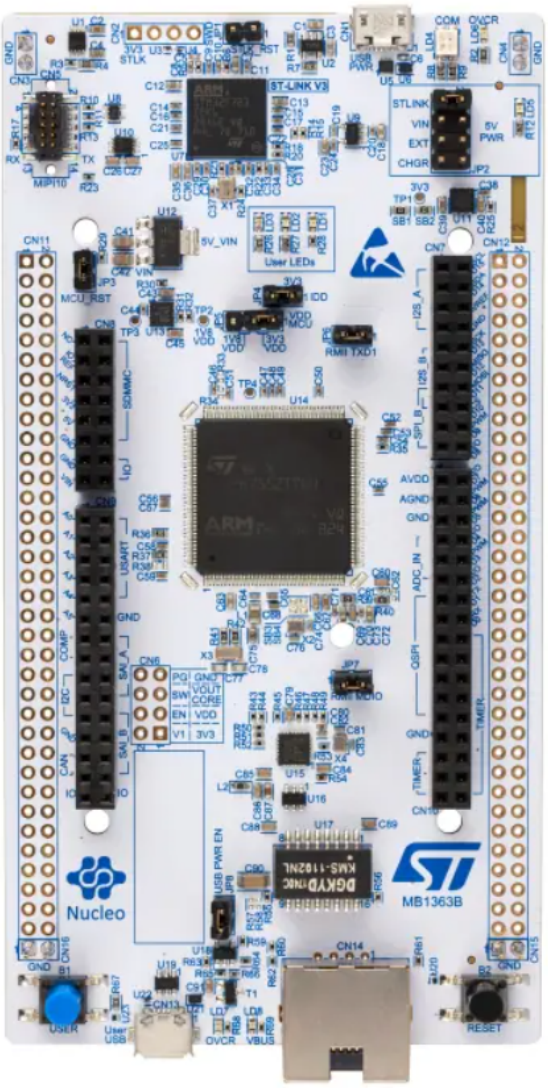


Figura 2.2: *Scheda di sviluppo STM32 NUCLEO-H745ZI-Q impiegata per il controllo embedded di basso livello.*

L'architettura del microcontrollore comprende:

- Un core ad alte prestazioni **ARM Cortex-M7** con frequenza di clock fino a 480 MHz e FPU a doppia precisione;
- Un core ad alta efficienza **ARM Cortex-M4** con clock a 240 MHz e FPU a singola precisione;
- 2 MB di memoria Flash con architettura dual-bank e 1 MB di memoria RAM interna.

Nell'architettura sviluppata, **l'intero firmware applicativo viene eseguito sul core Cortex-M4**. Il core M7 viene mantenuto in stato di boot passivo: questa scelta consente di evitare l'onere di sincronizzazione inter-core (hardware semaphores

HSEM, IPC), essendo le risorse del solo Cortex-M4 a 240 MHz ampiamente sufficienti a gestire il task di controllo a 100 Hz ($T_s = 10$ ms).

La Tabella 2.1 riassume l'assegnazione verificata delle periferiche hardware del microcontrollore.

Tabella 2.1: *Mappatura delle periferiche hardware dell'STM32H745 per il controllo della bicicletta.*

Periferica	**Funzione Eseguita**	**Parametri Operativi**
TIM1	Generazione PWM motore sterzo	20 kHz, Canale 1 (PE9)
TIM3	Generazione PWM motore trazione	20 kHz, Canale 1 (PA6)
TIM4	Interfaccia Encoder trazione	Decodifica in quadratura x4 (PD12, PD13)
TIM8	Interfaccia Encoder sterzo (predisposto)	Decodifica in quadratura x4 (PC6, PC7)
USART3	Comunicazione seriale Jetson/PC	921 600 baud, 8N1, Interrupt RX (PD8, PD9)
I2C1	Acquisizione IMU Bosch BNO055	Fast Mode 400 kHz (PB8, PB9)
ADC1	Campionamento sensore di corrente	16 bit con oversampling hardware (PA5)
TIM6	Timer cadenzatore di controllo	Interrupt periodico ogni 10 ms (100 Hz)

2.5 Attuatori e Driver di Potenza

2.5.1 Motori DC MAXON DCX35L

I due assi del veicolo sono azionati da motori in corrente continua a spazzole **MAXON DCX35L** (Figura 2.3). Questi attuatori presentano un rotore privo di ferro con avvolgimento a gabbia, caratterizzato da un ridotto momento d'inerzia rotorico e da una contenuta costante di tempo meccanica, requisiti necessari per assecondare la dinamica richiesta dall'anello di bilanciamento.



Figura 2.3: *Motore in corrente continua MAXON DCX35L con riduttore epicicloidale integrato.*

2.5.2 Driver di Potenza Cytron MD10C R3

Il pilotaggio in potenza dei due motori è affidato a driver a ponte-H **Cytron MD10C R3** (Figura 2.4). Ciascun driver è in grado di erogare una corrente continua nominale fino a 10 A (con correnti di picco ammissibili di 30 A) e accetta tensioni di ingresso comprese tra 5 V e 30 V. Il controllo avviene tramite due segnali logici digitali provenienti dal microcontrollore:

- Un segnale **PWM** a 20 kHz per regolare la tensione efficace applicata agli avvolgimenti (duty cycle da 0% a 100%);
- Un segnale logico **DIR** per stabilire il verso di rotazione (marcia avanti/indietro per la trazione; sterzata a destra/sinistra per lo sterzo).

La scelta di una frequenza di commutazione PWM di 20 kHz garantisce un funzionamento silenzioso (al di fuori dello spettro udibile) e riduce sensibilmente il ripple di corrente, preservando la vita termica del motore.

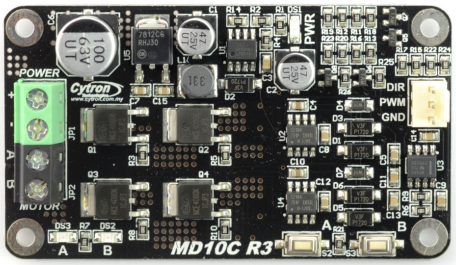


Figura 2.4: *Driver di potenza a ponte-H Cytron MD10C R3.*

2.6 Sensori di Bordo

2.6.1 Unità di Misura Inerziale (IMU) Bosch BNO055

La stima dello stato cinematico e dell'assetto del telaio è effettuata tramite l'unità di misura inerziale **Bosch BNO055** [7] (Figura 2.5), fissata rigidamente su un supporto collocato al posto dell'alloggiamento della sella. Il dispositivo racchiude:

- Un accelerometro triassiale a 14 bit;
- Un giroscopio triassiale a 16 bit ad alta dinamica;
- Un coprocessore ARM Cortex-M0 interno dedicato all'algoritmo di sensor fusion BSX.

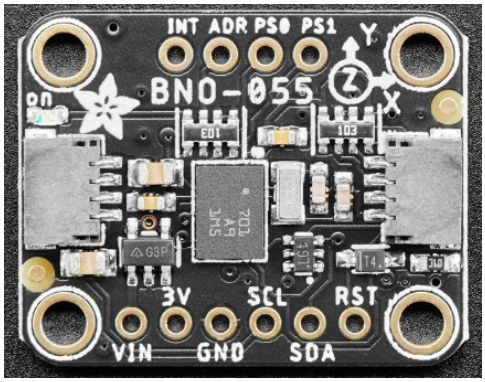


Figura 2.5: *Modulo sensore inerziale a 9 gradi di libertà Bosch BNO055.*

Per la stima d'assetto in tempo reale, il BNO055 esegue internamente l'algoritmo di fusione sensoriale sul coprocessore Cortex-M0 integrato, rendendo disponibili nei registri di uscita sia gli angoli di Eulero sia le velocità angolari giroscopiche con una risoluzione di quantizzazione nativa pari a $1\,\mathrm{LSB} = 1/16^\circ = 0.0625^\circ$ (e $1/16^\circ/\mathrm{s}$ per il giroscopio) [7]. Le grandezze acquisite dal firmware a 100 Hz via I2C (lettura sequenziale di 12 byte dai registri dati a partire dall'indirizzo `0x14`) sono:

1. L'**angolo di rollio** ϕ [°], grandezza controllata dell'assetto laterale (affetta dalla lieve latenza di fase propria del filtro di fusione interno del sensore);
2. La **velocità angolare di rollio** $\dot{\phi}$ [°/s], prelevata direttamente dai registri del giroscopio (previa rimozione del bias statico a riposo) per garantire uno smorzamento derivativo esente da ritardi di filtraggio aggiuntivi;
3. La **velocità angolare di imbardata** (*yaw rate*) $\dot{\psi}$ [°/s], variabile di rotta.

2.6.2 Encoder Ottico Incrementale Avago HEDL5540

Sull'albero di ciascuno dei due motori (trazione e sterzo) è montato un encoder ottico incrementale **Avago HEDL5540** [8] (Figura 2.6), provvisto di tre canali con uscite differenziali di linea (Line Driver).



Figura 2.6: *Encoder ottico incrementale HEDL5540 installato sui motori del prototipo.*

Nella configurazione sperimentale adottata per il presente lavoro, l'encoder associato al motore di sterzo (il cui interfacciamento è predisposto sui pin PC6 e PC7 del timer TIM8) non risultava alimentato e non è stato impiegato come retroazione, scegliendo di concentrare lo sviluppo sulla stabilizzazione dell'equilibrio mediante le sole grandezze inerziali dell'IMU. È stato invece utilizzato attivamente l'encoder relativo al motore di trazione, i cui segnali single-ended (estratti dall'uscita differenziale in assenza di un line receiver dedicato a bordo) sono collegati ai pin PD12 e PD13 del timer TIM4 configurato in modalità contatore encoder hardware. Grazie alla decodifica in quadratura x4, la risoluzione nativa di 500 impulsi per giro (PPR) viene quadruplicata a:

$$N_{cnt} = 500 \times 4 = 2000 \quad \text{conteggi per giro motore} \tag{2.1}$$

La velocità lineare di avanzamento v (in m/s) è ricavata ad ogni ciclo di campionamento $T_s = 10\,\text{ms}$ mediante la relazione cinematica:

$$v = \frac{\Delta N_{enc}}{T_s} \cdot \frac{1}{N_{cnt} \cdot G_{rid}} \cdot \left(\frac{N_{corona}}{N_{pignone}} \right) \cdot 2\pi r_w \tag{2.2}$$

dove ΔN_{enc} è la variazione del conteggio degli impulsi nell'intervallo $T_s = 10\,\text{ms}$, $N_{cnt} = 2000$ rappresenta il numero di fronti per giro motore, $G_{rid} = 66$ è il rapporto del riduttore epicicloidale, $N_{corona} = 28$ e $N_{pignone} = 18$ indicano rispettivamente il numero di denti della corona calettata sull'albero ridotto e del pignone solidale alla ruota, e r_w è il raggio nominale della ruota posteriore impostato nel firmware.

2.6.3 Sensore di Corrente Allegro ACS712

In serie agli avvolgimenti del motore di sterzo è inserito un sensore di corrente ad effetto Hall **Allegro ACS712** (Figura 2.7).

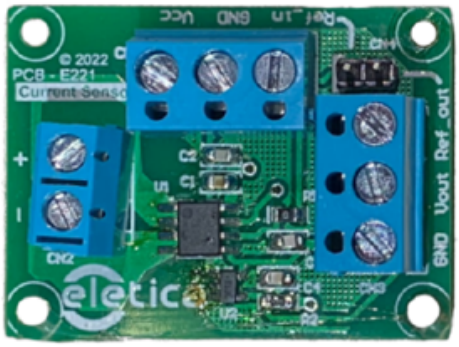


Figura 2.7: *Modulo sensore di corrente ACS712 per il monitoraggio e la protezione termica dello sterzo.*

Il componente fornisce una misura isolata galvanicamente della corrente bidirezionale I_{sterzo}. A fronte di un'alimentazione nominale a 5 V, l'uscita analogica a riposo ($I = 0\,\text{A}$) si attesta intorno a $V_{zero} \approx 2.5 \div 2.76\,\text{V}$ ed è adattata alla dinamica d'ingresso $0 \div 3.3\,\text{V}$ dell'ADC1 (a 16 bit con oversampling hardware 1024×) tramite un partitore resistivo con rapporto di attenuazione pari a 1.506, a cui corrisponde una sensibilità effettiva lato sensore calibrata sul banco di 217.4 mV/A. All'avvio (o su comando da interfaccia MATLAB), il firmware acquisisce 60 campioni a motori fermi per calibrare lo zero stazionario V_{zero} e applica a 100 Hz un filtro passa-basso digitale IIR del primo ordine ($I_{filt}[k] = 0.75\, I_{filt}[k-1] + 0.25\, I_{raw}[k]$) per attenuare il rumore di commutazione PWM, impiegando la misura risultante per la protezione termica anti-stallo del motoriduttore.

2.7 Alimentazione e Gestione della Potenza

La bicicletta è energeticamente autonoma grazie a un pacco batterie a polimeri di litio (**LiPo 4S**) da 14.8 V nominali (16.8 V a piena carica) e capacità di 4800 mAh. I driver di potenza Cytron sono collegati direttamente al bus di alimentazione della batteria; per fornire le alimentazioni logiche isolate alla scheda STM32 (5 V) e ai circuiti ausiliari e di misura, la linea di potenza è sdoppiata mediante regolatori switching Step-Down **LM2596** (Figura 2.8).



Figura 2.8: *Convertitore DC-DC Step-Down LM2596 per la stabilizzazione della tensione logica.*

La Tabella 2.2 sintetizza le specifiche elettriche e le soglie di sicurezza attive nel firmware.

Tabella 2.2: *Specifiche elettriche e parametri di clamping di sicurezza.*

Parametro Elettrico	**Valore**	**Descrizione**
Tensione batteria nominale	14.8 V	Pacco LiPo 4S (4 celle in serie)
Tensione massima sterzo ($V_{steer,max}$)	5.5 V	Clamping software di sicurezza
Tensione massima trazione ($V_{trac,max}$)	11.5 V	Limite software per velocità $\geq$ 1.5 m/s
Corrente massima di sterzo (I_{cut})	5.0 A	Soglia di intervento per protezione termica

Capitolo 3

Modellazione Dinamica e Teoria del Controllo

3.1 Convenzione e Misure di Assetto (Angoli di Eulero)

Prima di procedere alla descrizione del modello, è opportuno definire la convenzione adottata per descrivere l'assetto del veicolo nello spazio tridimensionale, basata sulla formulazione degli angoli di Eulero:

- **Rollio (Roll, ϕ):** descrive la rotazione attorno all'asse longitudinale della bicicletta (direzione di avanzamento). Un rollio nullo ($\phi = 0°$) indica che il veicolo è perfettamente verticale; secondo la convenzione adottata nel firmware e nell'analisi dei dati, $\phi > 0$ corrisponde a un'inclinazione del telaio verso **sinistra** e $\phi < 0$ a un'inclinazione verso **destra** (rispetto al senso di marcia). L'obiettivo primario del controllo è azzerare l'errore di rollio, evitando che il veicolo si inclini lateralmente e cada;
- **Beccheggio (Pitch, θ):** descrive la rotazione attorno all'asse trasversale. Nel contesto di questa tesi, il beccheggio è legato alle pendenze stradali e ai trasferimenti di carico in accelerazione o frenata, ma non partecipa direttamente alla stabilizzazione dell'equilibrio laterale;
- **Imbardata (Yaw, ψ):** descrive la rotazione del veicolo attorno all'asse verticale. L'angolo di imbardata e la sua derivata temporale (velocità angolare di imbardata o *yaw rate*, $\dot{\psi}$) descrivono l'orientamento sul piano orizzontale, assumendo $\dot{\psi} > 0$ per una rotazione antioraria (svolta verso **sinistra**) e $\dot{\psi} < 0$ per una rotazione oraria (svolta verso **destra**).

Queste grandezze di assetto sono acquisite costantemente attraverso il sensore inerziale (IMU) montato a bordo.

3.2 Dinamica del Rollio e Modello del Pendolo Inverso

La modellazione matematica dei veicoli a due ruote costituisce un problema classico e articolato della meccanica analitica [2, 9]. Ai fini dell'inquadramento fisico del

problema di stabilizzazione, è utile richiamare preliminarmente l'analogia semplificata della bicicletta come un pendolo inverso vincolato a terra lungo la retta di contatto degli pneumatici.

Considerando un baricentro posto a un'altezza h da terra e una massa complessiva m, l'equazione di moto per l'angolo di inclinazione laterale ϕ (rollio) nell'intorno della verticale ($\phi \approx 0$) è dominata dalla forza di gravità, che genera un momento ribaltante instabile. In prima approssimazione lineare, il bilancio dei momenti attorno all'asse di appoggio longitudinale si esprime come:

$$J\ddot{\phi} = mgh\phi + \tau_{ext} \tag{3.1}$$

dove J indica il momento d'inerzia equivalente rispetto all'asse di rollio e τ_{ext} raccoglie i momenti esterni raddrizzanti generati dall'interazione pneumatico-suolo.

La relazione (3.1) mette in evidenza l'origine dell'instabilità del rollio: il termine $mgh\phi$ ha segno positivo, per cui un'inclinazione iniziale, anche piccola, cresce in modo esponenziale con costante di tempo dell'ordine di $\sqrt{J/(mgh)}$. Il modello non descrive l'attuatore di sterzo né l'accoppiamento tra l'angolo δ e la reazione laterale al suolo; per questo motivo i guadagni del regolatore PD non sono ricavati da esso, ma tarati sperimentalmente sul prototipo (Capitolo 5).

Una descrizione dinamica completa del moto laterale a velocità di avanzamento costante v è fornita in letteratura dal modello linearizzato del quarto ordine di Whipple-Carvallo [2], nelle variabili di stato $[\phi, \delta, \dot{\phi}, \dot{\delta}]^T$. Dall'analisi degli autovalori di tale modello di riferimento al variare della velocità longitudinale v, si distinguono tipicamente tre regimi qualitativi, la cui effettiva estensione dipende strettamente dalla configurazione geometrica e inerziale del veicolo (avancorsa, inclinazione del cannotto di sterzo, distribuzione delle masse [10]):

1. A **basse velocità** ($0 \leq v < v_w$), il sistema presenta autovalori a parte reale positiva associati al modo oscillatorio divergente di *weave* (serpeggiamento laterale);

2. In un eventuale intervallo di **velocità intermedie** ($v_w \leq v \leq v_{cap}$, collocato indicativamente intorno a $4 \div 6\,\mathrm{m/s}$ per la bicicletta benchmark di Meijaard et al. [2]), l'interazione tra avancorsa, distribuzione di massa ed effetti giroscopici può conferire auto-stabilità passiva;

3. A **velocità più elevate** ($v > v_{cap}$), può manifestarsi la lieve instabilità non oscillatoria del modo di *capsize* (ribaltamento lento). Nelle condizioni operative esplorate sul prototipo in esame ($v \in [1.0, 2.0]\,\mathrm{m/s}$), il veicolo opera ben al di sotto della soglia di auto-stabilità passiva e richiede pertanto un'azione di controllo attivo in retroazione per prevenire la caduta.

3.3 Il Principio Fisico del Controsterzo (*Counter-Steering*)

La stabilizzazione attiva dell'equilibrio laterale mediante il solo attuatore di sterzo si fonda sul principio meccanico del **controsterzo** (*counter-steering*) [3].

Considerando la cinematica planare semplificata a piccole inclinazioni e per un passo tra le ruote pari a L:

- Quando la bicicletta subisce una perturbazione che la inclina verso destra ($\phi < 0$), il baricentro G si sposta lateralmente rispetto alla retta di contatto al suolo, sottoposto al momento ribaltante gravitazionale $M_{grav} = mgh \sin\phi$;
- Per contrastare la caduta, l'attuatore deve ruotare la ruota anteriore nella direzione dell'inclinazione stessa (verso destra, $\delta < 0$);
- L'avanzamento a velocità v lungo la traiettoria curvilinea istantanea di raggio $R \approx L/(\delta \cos\varepsilon)$ (con ε angolo di inclinazione del cannotto) riconduce la linea di appoggio sotto la proiezione del baricentro e genera un'accelerazione centripeta alla base degli pneumatici, cui corrisponde un momento apparente raddrizzante sul telaio:

$$M_{rec} = m\left(\frac{v^2}{R}\right) h\cos\phi \approx m\frac{v^2}{L} h\,\delta \tag{3.2}$$

Dal punto di vista della teoria dei sistemi, la funzione di trasferimento linearizzata tra l'azione di sterzo e l'angolo di rollio $\phi(s)$ dipende dal modello adottato, dal punto di lavoro (in particolare dalla velocità v) e dai parametri geometrici e inerziali del telaio [3, 9]. Nelle configurazioni ciclistiche convenzionali operanti a basse velocità, oltre alla presenza di poli instabili nel semipiano destro $\mathbb{C}^+$, la dinamica ingresso-uscita può presentare uno **zero a parte reale positiva** (comportamento a *fase non minima*) legato alla necessità fisica di spostare inizialmente l'impronta a terra verso il lato della caduta prima che il momento centrifugo raddrizzi il telaio. Tale caratteristica impone vincoli stringenti sulla larghezza di banda e sul margine di fase dell'anello di stabilizzazione, penalizzando l'introduzione di ritardi di filtraggio o di azioni integrali pure sull'errore di rollio [3].

3.4 Approcci al Controllo del Bilanciamento e Scelta del Regolatore PD

In letteratura scientifica, la stabilizzazione attiva di biciclette autonome è stata affrontata mediante diverse famiglie di regolatori, ciascuna caratterizzata da specifici compromessi tra complessità modellistica, dotazione sensoriale richiesta e onere computazionale [3, 9]. Si possono individuare tre direttrici principali:

1. **Controllo Proporzionale-Derivativo (PD/PID) sull'assetto di rollio** [3, 11]: l'azione di comando allo sterzo è calcolata combinando una retroazione proporzionale sull'errore di rollio $e_\phi = \phi_{ref} - \phi$ e un termine derivativo

proporzionale alla velocità di rollio $\dot{\phi}$. Come evidenziato da Åström et al. [3], il termine proporzionale fornisce l'azione raddrizzante (attraverso l'accelerazione centripeta proporzionale a $v^2\delta$), mentre il termine derivativo introduce lo smorzamento indispensabile a stabilizzare i poli coniugati o reali instabili a bassa velocità. Il principale vantaggio risiede nel ridotto numero di parametri da tarare (due soli guadagni, $K_{p,roll}$ e $K_{d,roll}$) e nella possibilità di prelevare la derivata $\dot{\phi}$ direttamente dal giroscopio dell'IMU, evitando la differenziazione numerica e non richiedendo la misura dell'angolo di sterzo δ.

2. **Regolatori Lineari Quadratici (LQR) a retroazione dello stato completo** [2, 9]: basati sul modello linearizzato del quarto ordine di Whipple-Carvallo, calcolano il comando ottimo $u = -K_{LQR}\, x$ sullo stato completo $x = [\phi, \delta, \dot{\phi}, \dot{\delta}]^T$. Pur offrendo garanzie formali di stabilità locale attorno al punto di linearizzazione, l'approccio LQR richiede: (i) la conoscenza accurata dei parametri inerziali e geometrici delle quattro componenti rigide del veicolo (fino a 25 parametri nel benchmark di Meijaard et al. [2]) per costruire le matrici dinamiche $A(v)$ e $B(v)$; (ii) la misura diretta (tramite encoder assoluto sul cannotto di sterzo) o la stima tramite osservatore di Kalman sia dell'angolo di sterzo δ sia della sua derivata $\dot{\delta}$.

3. **Controlli basati su modello non lineare e predittivi (inversione dinamica, controllo robusto, MPC)** [12, 9]: sfruttano modelli non lineari accoppiati per compensare le variazioni di velocità o gestire esplicitamente i vincoli sugli attuatori su un orizzonte preditivo. Tali schemi presentano tuttavia un'elevata sensibilità alle incertezze strutturali non modellate – quali i giochi meccanici del riduttore epicicloidale, l'attrito secco del piantone e la cedevolezza del pneumatico a bassa velocità – oltre a richiedere la risoluzione in tempo reale di problemi di ottimizzazione vincolata (QP) ad ogni passo di campionamento.

La Tabella 3.1 sintetizza il confronto tra le tre famiglie di controllo in relazione ai vincoli architetturali del prototipo oggetto di tesi.

Tabella 3.1: *Confronto tra i principali approcci di controllo per il bilanciamento attivo in relazione alle caratteristiche del prototipo sperimentale.*

Criterio	**PD su Rollio (Adottato)**	**LQR (Stato Completo)**	**Controllo su Modello / MPC**
Sensori richiesti	Solo IMU (ϕ, $\dot{\phi}_{gyro}$) ed encoder ruota (v)	IMU + Encoder angolo di sterzo ($\delta, \dot{\delta}$)	IMU + Encoder sterzo (δ) + stima stato completa
Dipendenza dal modello	Bassa (struttura basata sulla fisica, taratura empirica)	Elevata (matrici di massa, rigidezza e smorzamento)	Molto elevata (modello non lineare + attuatore)
Onere di calcolo (100 Hz)	Minimo (pochi prodotti in virgola mobile su Cortex-M4)	Basso (o medio se abbinato a filtro di Kalman)	Elevato (ottimizzazione numerica iterativa)
Taratura sperimentale	Diretta su 2 parametri fisicamente interpretabili (K_p, K_d)	Scelta matrici peso Q, R e ricalcolo al variare di v	Complessa in presenza di attriti e giochi meccanici

Per queste ragioni, l'adozione di un regolatore **PD per l'anello interno di rollio** (abbinato a un anello esterno proporzionale di yaw rate in cascata) si è rivelata la scelta più adatta alle caratteristiche del prototipo:

- **Mancato utilizzo del feedback sull'angolo di sterzo**: sebbene il prototipo preveda un encoder sull'asse di sterzo, nella configurazione sperimentale adottata tale sensore non risultava alimentato e si è scelto di concentrare lo sviluppo sulla stabilizzazione dell'equilibrio laterale mediante le sole grandezze inerziali dell'IMU; non essendo disponibile la misura diretta di δ, resta esclusa una retroazione dello stato completo di tipo LQR senza ricorrere a osservatori sensibili alle derive e ai giochi del motoriduttore (rapporto 66 : 1);
- **Incertezza parametrica e variabilità del carico**: l'alloggiamento dell'elettronica di potenza e del pacco batterie sul telaio introduce incertezze sui tensori d'inerzia e piccole variazioni della posizione del baricentro tra sessioni successive, rendendo poco affidabile una sintesi puramente analitica basata su parametri nominali;
- **Disponibilità diretta della velocità angolare**: il sensore inerziale BNO055 fornisce a 100 Hz sia l'angolo di rollio fuso ϕ sia la misura giroscopica diretta

$\dot{\phi}_{gyro}$, consentendo di implementare l'azione derivativa di smorzamento senza ricorrere a filtri derivatori numerici che introdurrebbero ritardi di fase critici;

- **Semplicità d'esecuzione embedded e rapidità di messa a punto**: l'esecuzione sul core ARM Cortex-M4 a 240 MHz con due soli guadagni disaccoppiati ($K_{p,roll}$ per la rigidezza di richiamo e $K_{d,roll}$ per lo smorzamento) ha permesso una taratura sperimentale diretta e interpretabile durante le sessioni di collaudo sul prototipo.

3.5 Architettura di Controllo Gerarchica

Per governare la complessa dinamica del veicolo è stata progettata un'architettura gerarchica basata su **tre regolatori attivi**: due anelli innestati in cascata per la dinamica trasversale dello sterzo (yaw rate → rollio) e un anello separato per la propulsione longitudinale (Figura 3.1).

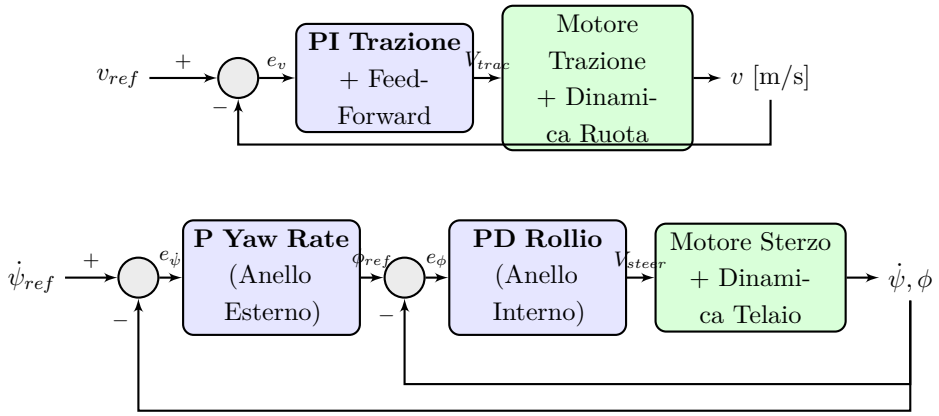


Figura 3.1: *Architettura di controllo implementata: anello di velocità longitudinale (in alto) e cascata a due anelli per lo sterzo (in basso), con uscita del PD di rollio direttamente in tensione.*

Il principio del controllo in cascata (*nested control*) si fonda sulla netta separazione delle scale temporali dei sottosistemi. Nell'implementazione finale gli anelli attivi sono:

1. **Anello Interno di Rollio (dinamica meccanica d'assetto)**: confronta l'angolo di piega misurato dall'IMU con il riferimento generato dall'anello esterno e, tramite la legge proporzionale-derivativa (PD) descritta nella Sezione 3.6 e specificata nella Sezione 5.3 (Eq. (5.4)), genera direttamente la tensione di comando del motore di sterzo. È l'anello centrale che mantiene la bicicletta in equilibrio contrastando attivamente la caduta;

2. **Anello Esterno di Yaw Rate (dinamica di navigazione)**: riceve il target di velocità angolare di imbardata $\dot{\psi}_{ref}$ (dal livello di pianificazione della

navigazione) e genera il riferimento di rollio ϕ_{ref} necessario a inscrivere la curva;

3. **Anello Indipendente di Trazione**: garantisce che la velocità di avanzamento v rimanga costante sul valore di riferimento comandato v_{ref}.

3.6 Algoritmo PID Discreto con Anti-Windup Back-Calculation

Tutti i regolatori sono implementati in **forma posizionale discreta** con periodo di campionamento costante $T_s = 0.01\,\text{s}$ (frequenza di esecuzione $f_s = 100\,\text{Hz}$).

3.6.1 Formulazione Matematica del Controllore PID Discreto

L'errore di inseguimento al passo discreto k è definito come:

$$e[k] = r[k] - y[k] \tag{3.3}$$

dove $r[k]$ è il riferimento desiderato e $y[k]$ è la variabile di processo misurata dai sensori. In conformità all'implementazione nel modulo firmware `pid.c` (`PID_Compute`), ad ogni passo di campionamento viene dapprima calcolato il contributo integrale provvisorio $I_{prov}[k]$ mediante integrazione di Eulero all'indietro (*backward Euler*):

$$I_{prov}[k] = I[k-1] + K_i \cdot T_s \cdot e[k] \tag{3.4}$$

L'azione di controllo provvisoria non saturata viene quindi calcolata sommando l'eventuale contributo in avanti (*feed-forward*) $u_{ff}[k]$, il termine proporzionale sull'errore, l'azione integrale provvisoria e l'azione derivativa:

$$u_{unsat}[k] = u_{ff}[k] + K_p \cdot e[k] + I_{prov}[k] + u_d[k] \tag{3.5}$$

dove il termine derivativo $u_d[k]$ può essere calcolato differenziando numericamente l'errore (`PID_Compute`) oppure, come adottato nell'anello di rollio (`PID_Compute_RollWithGyro`), direttamente sulla velocità angolare misurata dal giroscopio ($u_d[k] = -K_d \cdot \dot{\phi}_{gyro}[k]$). Questa seconda modalità evita l'amplificazione del rumore di discretizzazione ed elimina la necessità di filtri passa-basso aggiuntivi.

3.6.2 Anti-Windup con Metodo di Back-Calculation

Nei sistemi attuati reali, l'uscita del regolatore è vincolata da rigidi limiti fisici di saturazione ($u_{min} \leq u[k] \leq u_{max}$). Quando l'attuatore entra in saturazione (ad esempio a causa di un gradino di ampiezza elevata o di un disturbo persistente), l'anello di retroazione si apre: l'errore $e[k]$ continua ad accumularsi all'interno del termine integrale, generando il fenomeno del *windup integrale*. Quando l'errore si

inverte, il controllore impiega un tempo considerevole prima che l'integratore si scarichi, provocando forti sovraelongazioni e pericolosi ritardi di risposta.

Nel firmware sviluppato è stato implementato l'algoritmo di **Back-Calculation** di Åström e Hägglund [13]. L'uscita effettiva applicata all'attuatore è saturata entro i limiti operativi:

$$u_{sat}[k] = \text{clip}(u_{unsat}[k], u_{min}, u_{max}) \tag{3.6}$$

Lo stato integrale memorizzato per il passo temporale successivo viene quindi corretto sommando al valore provvisorio $I_{prov}[k]$ un termine di compensazione proporzionale alla differenza tra l'azione saturata e quella non saturata:

$$I[k] = I_{prov}[k] + K_b \cdot T_s \cdot (u_{sat}[k] - u_{unsat}[k]) \tag{3.7}$$

ossia, esplicitando $I_{prov}[k]$, $I[k] = I[k-1] + K_i T_s e[k] + K_b T_s (u_{sat}[k] - u_{unsat}[k])$, dove K_b è il coefficiente di tracking anti-windup (tipicamente impostato pari a 1.0). In regime lineare $u_{sat} = u_{unsat}$ e la correzione è nulla; in presenza di saturazione, la differenza $(u_{sat} - u_{unsat})$ agisce come retroazione negativa scaricando progressivamente l'integratore con una dinamica regolata da $1/K_b$, mantenendo l'uscita pronta a desaturare tempestivamente non appena l'errore inverte il segno.

3.6.3 Feed-Forward di Velocità per la Trazione

Nell'anello di trazione longitudinale, per accelerare la risposta al gradino e ridurre l'errore durante i transitori senza dover incrementare eccessivamente il guadagno proporzionale, al comando calcolato dal PI viene sommato un contributo di **Feed-Forward**:

$$V_{trac}[k] = u_{PI}[k] + K_{FF} \cdot v_{ref}[k] \tag{3.8}$$

dove $K_{FF} = 3.8\,\text{V}/(\text{m/s})$ è il coefficiente elettro-meccanico identificato sperimentalmente, corrispondente al rapporto stazionario tra la tensione applicata al ponte-H e la velocità lineare della ruota a regime. Il Feed-Forward fornisce immediatamente la tensione necessaria a sostenere il moto a regime, lasciando al termine integrale il solo compito di compensare i piccoli attriti residui e le pendenze del terreno.

Capitolo 4

Architettura Software Embedded e Comunicazione

4.1 Architettura del Firmware Embedded su STM32H745

Il firmware di basso livello è sviluppato in linguaggio C all'interno dell'ambiente **STM32CubeIDE** (GNU Arm Embedded Toolchain) ed è strutturato secondo un'architettura *bare-metal* di tipo **foreground/background cadenzata da timer hardware**, eseguita sul core ARM Cortex-M4 a 240 MHz. Ad ogni periodo di campionamento $T_s = 10.0\,\text{ms}$ (100 Hz), l'interrupt del timer TIM6 scandisce l'acquisizione dell'IMU via I2C, la lettura dell'encoder e del sensore di corrente, il calcolo dei tre regolatori e la trasmissione della telemetria su linea UART.

4.1.1 Organizzazione Modulare del Codice

Il codice è strutturato secondo il paradigma della programmazione modulare in C con incapsulamento dei dati e separazione delle interfacce. La Tabella 4.1 sintetizza l'architettura dei moduli del firmware.

Tabella 4.1: *Moduli software del firmware STM32 e relative responsabilità.*

Modulo	File Sorgente	Responsabilità Funzionale
Main Core	`main.c`	Setup periferiche, boot e ciclo principale a flag
Control Loop	`control.c/h`	Macchina a stati, gestione anelli PID e logiche fail-safe
PID Library	`pid.c/h`	Algoritmo PID con compensazione Anti-Windup via Back-Calculation
Communication	`comm.c/h`	Parser seriale BFMC con sliding window su ring buffer
CRC32 Engine	`crc32.c/h`	Calcolo del checksum IEEE 802.3 via lookup table
IMU Driver	`bno055.c/h`	Driver di comunicazione I2C per sensore Bosch BNO055
Encoder Kinematics	`encoders.c/h`	Lettura timer encoder hardware e conversione in velocità [m/s]
Motor Actuation	`motors.c/h`	Pilotaggio registri PWM e direzione per ponti-H Cytron
Current Sensing	`current_sense.c/h`	Calibrazione zero e filtraggio IIR sensore ACS712
Vehicle Config	`vehicleConfig.h`	Parametri fisici del telaio e guadagni di default

4.1.2 File di Configurazione Centralizzata: `vehicleConfig.h`

Tutte le costanti geometriche del veicolo, le soglie di sicurezza elettriche e i parametri di taratura di default dei regolatori sono stabilite esclusivamente all'interno dell'header file `vehicleConfig.h`. Questo approccio evita la dispersione di costanti numeriche cablate negli algoritmi e consente di adattare il firmware ad eventuali modifiche geometriche del prototipo intervenendo in un unico file di configurazione.

4.2 Macchina a Stati del Controllore

Il funzionamento del firmware è regolato da una macchina a stati finiti implementata in `control.c`, che supervisiona le transizioni operative a salvaguardia dell'incolumità del veicolo e degli operatori:

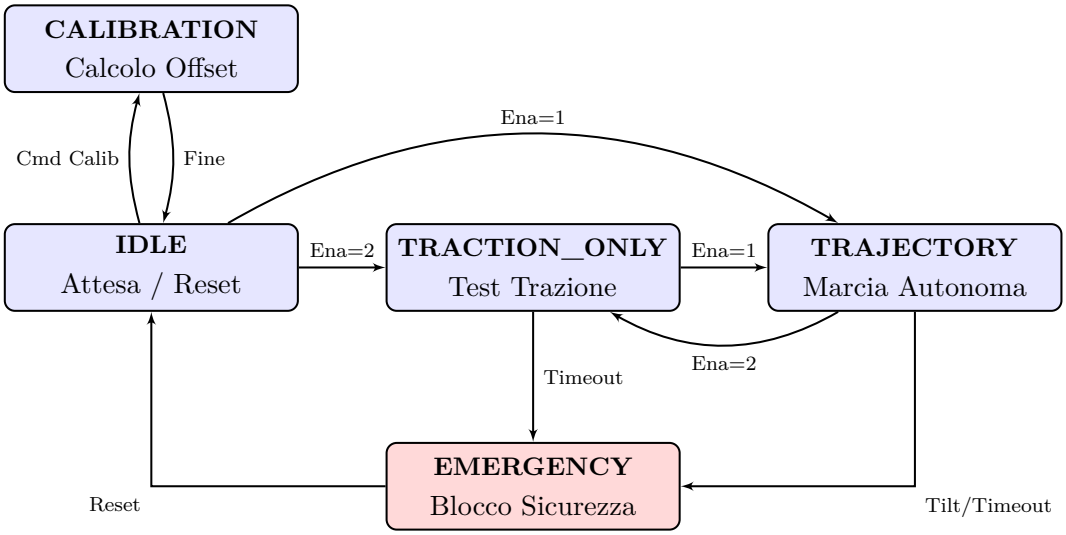


Figura 4.1: *Diagramma degli stati del controllore di bordo implementato in* `control.c`.

Le modalità operative comprendono:

- **CTRL_MODE_IDLE**: stato di quiete iniziale a motori disabilitati. Gli integratori di tutti i PID vengono mantenuti forzatamente a zero per azzerare qualsiasi memoria pregressa;
- **CTRL_MODE_CALIBRATION**: eseguita all'avvio o su comando esplicito da seriale. Il sistema campiona le uscite del sensore di corrente ACS712 e dell'IMU a veicolo fermo e verticale, aggiornando le tabelle di offset;
- **CTRL_MODE_TRACTION_ONLY**: modalità di collaudo in cui è attivo esclusivamente il PID di trazione, lasciando lo sterzo disattivato. Impiegata per validare la risposta al gradino di velocità;
- **CTRL_MODE_TRAJECTORY**: modalità operativa completa. I tre regolatori attivi (yaw rate, rollio e trazione) operano in sequenza ad ogni tick da 10 ms;
- **CTRL_MODE_EMERGENCY**: stato di blocco di emergenza ad alta priorità. I segnali PWM vengono azzerati istantaneamente e il driver di potenza viene disabilitato.

4.2.1 Implementazione dell'Algoritmo PID in C

L'algoritmo di controllo PID è stato implementato in logica discreta adottando la *forma posizionale* approssimata all'indietro (Backward Euler), integrandovi il circuito di anti-windup tramite Back-Calculation. Di seguito è riportato un estratto essenziale del codice C in `pid.c`, che viene invocato ciclicamente per calcolare il segnale di controllo:

```
typedef struct {
    float Kp;
    float Ki;
    float Kd;
    float Kb; // Back-calculation gain
    float out_max;
    float out_min;

    float err_prev;
    float integral;
} PID_Controller;

float PID_Compute(PID_Controller *pid, float setpoint, float measured,
     float dt) {
    float err = setpoint - measured;
    float P = pid->Kp * err;

    // Aggiornamento integrale con limitazione
    pid->integral += pid->Ki * err * dt;

    float D = pid->Kd * (err - pid->err_prev) / dt;
    float out_unclamped = P + pid->integral + D;

    float out_clamped = out_unclamped;
    if (out_clamped > pid->out_max) out_clamped = pid->out_max;
    if (out_clamped < pid->out_min) out_clamped = pid->out_min;

    // Anti-windup (Back-calculation)
    float diff = out_clamped - out_unclamped;
    pid->integral += pid->Kb * diff * dt;

    pid->err_prev = err;
    return out_clamped;
}
```

Il segnale finale `out_clamped` viene poi convertito in un duty-cycle PWM trasmesso ai driver dei motori.

Si precisa che la routine `PID_Compute` qui riportata implementa la forma generale di controllo discreto (con azione derivativa calcolata sull'errore), impiegata per l'anello di trazione longitudinale (in cui $K_d = 0$, configurando un regolatore PI) e per l'anello di imbardata (puramente proporzionale, con $K_d = 0$ e $K_i = 0$). Per l'anello interno di rollio, al fine di evitare il rumore di quantizzazione della differenziazione numerica, il firmware calcola l'azione smorzante derivativa direttamente a partire dalla velocità angolare misurata dal giroscopio ($\dot{\phi}_{gyro}$), come mostrato nell'Eq. (5.4) del Capitolo 5.

4.3 Logiche di Sicurezza Fail-Safe (Safety-Critical)

Data la massa del veicolo e le velocità raggiungibili, il firmware incorpora diversi meccanismi di protezione concorrenti:

1. **Watchdog di Comunicazione**: se il microcontrollore non riceve pacchetti di comando validi per un tempo continuativo superiore a 250 tick temporali (2.5 secondi), il sistema disabilita autonomamente i motori riportandosi in stato sicuro;

2. **Protezione da Inclinazione Eccessiva (*Tilt Limit*)**: se l'angolo di rollio stimato supera la soglia critica di $\pm 10.0°$, la bicicletta è considerata in caduta irreversibile e il controllo commuta in `CTRL_MODE_EMERGENCY` azzerando l'erogazione di coppia;

3. **Protezione Termica Anti-Stallo (ACS712)**: mentre la protezione rapida da sovracorrenti impulsive di corto circuito (fino a 30 A) è gestita in hardware dal driver Cytron MD10C, la misura filtrata IIR del sensore ACS712 (campionata a 100 Hz) realizza una protezione termica software contro lo stallo meccanico: se la corrente media filtrata supera la soglia di 5.0 A, la tensione di sterzo viene azzerata nel ciclo corrente e, qualora il sovraccarico persista per oltre 15 cicli consecutivi (150 ms), il sistema transita in arresto di emergenza per prevenire il surriscaldamento degli avvolgimenti e del modulo di alimentazione;

4. **Clamping Software di Saturazione**: le tensioni generate dal controllo sono rigidamente limitate a ± 5.5 V per lo sterzo e a 11.5 V per la trazione.

4.4 Protocollo Seriale Binario BFMC con CRC32

La trasmissione dei dati tra il microcontrollore e il sistema di supervisione (Jetson o MATLAB) avviene su collegamento seriale UART a **921 600 baud**, con frame a 8 bit di dati, nessun bit di parità e 1 bit di stop (8N1). Il protocollo adotta il formato sviluppato nell'ambito della competizione automobilistica universitaria *Bosch Future Mobility Challenge* (BFMC), garantendo standard di robustezza e compatibilità con i nodi ROS 2 sviluppati in parallelo dal laboratorio.

4.4.1 Struttura dei Pacchetti di Comando e Telemetria

Il protocollo prevede pacchetti a dimensione prefissata protetti da un codice a ridondanza ciclica a 32 bit (CRC32 IEEE 802.3, polinomio riflesso `0xEDB88320`):

Tabella 4.2: *Struttura del pacchetto di comando RX (13 byte, frequenza 50 Hz).*

Offset	Campo	Tipo	Descrizione
0	`enable`	`uint8`	0=IDLE, 1=Traiettoria, 2=Solo Trazione
1–4	`linear_speed_ref`	`float32`	Riferimento velocità trazione [m/s]
5–8	`yaw_rate_ref`	`float32`	Riferimento yaw rate sterzo [deg/s]
9–12	`crc32`	`uint32`	Checksum CRC32 sui primi 9 byte

Tabella 4.3: *Struttura del pacchetto di telemetria TX (60 byte totali: 14 float da 4 byte + 1 CRC32 da 4 byte, frequenza 100 Hz).*

Canale	Campo Telemetrico	Unità	Origine del Dato
1	Velocità lineare di avanzamento	m/s	Encoder ottico (in quadratura)
2	Velocità di imbardata ($\dot{\psi}$)	deg/s	Giroscopio IMU BNO055
3	Angolo di rollio (ϕ)	deg	Sensor Fusion IMU BNO055
4	Velocità angolare di rollio ($\dot{\phi}$)	deg/s	Giroscopio IMU BNO055
5	Angolo di sterzo (predisposto)	deg	Encoder sterzo presente ma non alimentato né utilizzato
6	Corrente assorbita sterzo	A	Sensore ad effetto Hall ACS712
7	Tensione comandata allo sterzo	V	Uscita controllore rollio (V_{steer})
8	Tensione comandata alla trazione	V	Uscita controllore trazione (V_{trac})
9	Modalità di controllo	–	Stato FSM (IDLE, TRAJ, TRAC, EMERG)
10	Stato integrità IMU	–	Flag diagnostico (1=OK, 0=Errore)
11	Contatore watchdog comunicazione	–	Tick senza pacchetti RX validi
12	Contatore errori consecutivi IMU	–	Tick di timeout I2C consecutivi
13	Errore regolatore di trazione (e_v)	m/s	Differenza $v_{ref} - v$
14	Campo riservato (*spare*)	–	Riservato per usi futuri
–	Checksum CRC32 (uint32)	–	Calcolato sui primi 56 byte del payload

4.4.2 Meccanismo di Sincronizzazione: Sliding Window Multi-Formato su Ring Buffer

A differenza di protocolli che impiegano sequenze di start fisse non protette, il parser implementato in `comm.c` adotta una tecnica a **finestra scorrevole (*sliding window*) con discriminazione del primo byte e validazione CRC32**, che

permette la coesistenza sullo stesso canale UART di tre diversi formati di pacchetto RX:

1. **Pacchetto di controllo standard (13 byte)**: se il byte in testa alla coda circolare (`rx_ring[rx_tail]`) appartiene all'insieme $\{0, 1, 2\}$ (campo `enable`) e nel buffer sono presenti almeno 13 byte, il parser calcola il CRC32 sui primi 9 byte e lo confronta con gli ultimi 4 byte;

2. **Pacchetto di configurazione guadagni a runtime (`0xFE`, 53 byte nella versione estesa o 33 byte legacy)**: se il byte iniziale vale `0xFE` e nel buffer sono disponibili i byte dell'intera struttura `CfgPacket_t`, viene verificato il CRC32 sul payload dei parametri PID;

3. **Pacchetto di ricalibrazione zero corrente (`0xFF`, 5 byte)**: se il byte iniziale vale `0xFF` e sono presenti almeno 5 byte, viene validato il CRC32 sul singolo byte di comando.

Qualora un pacchetto venga validato dal controllo CRC32, esso viene estratto e l'indice di lettura `rx_tail` avanza dell'intera lunghezza del frame riconosciuto; se invece il CRC32 non coincide (ad esempio perché un byte interno a un float in un flusso disallineato assume casualmente il valore `0xFE` o `0x01`), `rx_tail` avanza di un singolo byte (`rx_tail++`), garantendo il riallineamento automatico di trama con una probabilità di falso positivo nell'ordine di 2^{-32}.

4.5 Interfaccia di Monitoraggio e Telemetria MATLAB

Durante lo sviluppo del prototipo e l'esecuzione dei test, l'interfaccia grafica custom sviluppata in ambiente **MATLAB** (Figura 4.2) ha svolto **solo parzialmente** le funzioni previste per l'*High-Level Controller* su NVIDIA Jetson / ROS 2 [14, 15]. Nello specifico, l'applicativo MATLAB sostituisce l'unità superiore per quanto riguarda la comunicazione seriale BFMC, l'invio di riferimenti costanti o a gradino e la supervisione telemetrica, ma non implementa la stima odometrica in tempo reale, la pianificazione della traiettoria né la correzione dinamica (*live*) del riferimento di yaw rate $\dot{\psi}_{ref}(t)$.

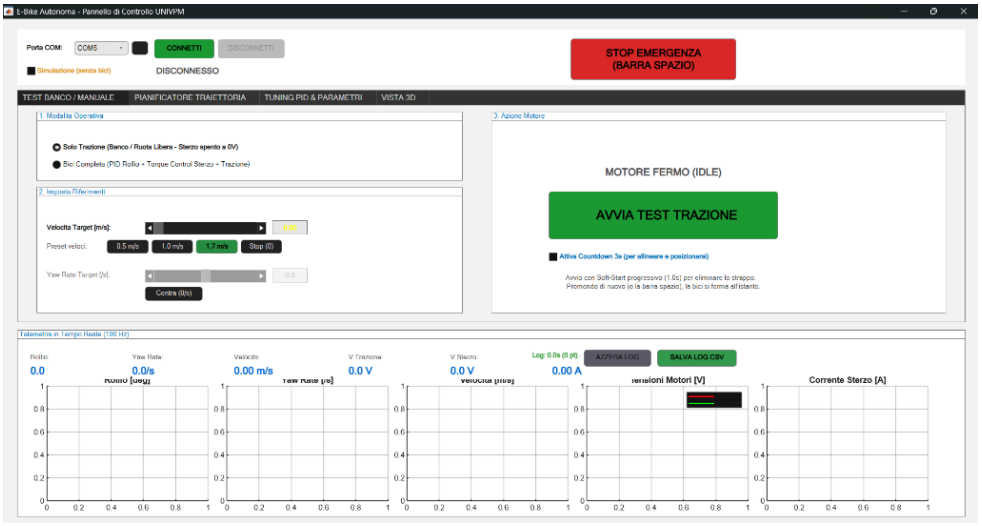


Figura 4.2: *Pannello dell'interfaccia grafica MATLAB sviluppata per la supervisione telemetrica e il collaudo del prototipo.*

L'interfaccia svolge quattro funzioni operative:

1. **Generazione dei Riferimenti**: invio dei pacchetti di comando a 50 Hz con setpoint di velocità e yaw rate impostabili tramite slider o profili a gradino temporizzati;

2. **Monitoraggio in Tempo Reale**: ricezione dello streaming telemetrico trasmesso a 100 Hz dall'STM32, visualizzazione strumentale dell'assetto e aggiornamento a schermo dei grafici di rollio, tensione e velocità;

3. **Tuning Dinamico dei Guadagni**: trasmissione dei pacchetti di configurazione con identificatore `0xFE` che consentono di modificare i coefficienti dei controllori e l'offset di rollio a runtime senza dover ricompilare e riprogrammare la memoria Flash del microcontrollore;

4. **Logging**: registrazione di ogni sessione di prova in file `.csv` corredati dei timestamp di ricezione lato PC (a una frequenza media effettiva di memorizzazione inferiore ai 100 Hz del microcontrollore a causa dei tempi di rendering grafico dell'ambiente MATLAB, come analizzato nella Sezione 6.4).

Capitolo 5

Identificazione del Modello e Taratura dei Regolatori

5.1 Identificazione del Modello per l'Anello di Rollio

La progettazione del sistema di controllo prende le mosse dalle attività di identificazione *data-driven* della dinamica di rollio in anello aperto svolte nel precedente progetto di Laboratorio di Automazione [1], di cui si richiamano sinteticamente i risultati principali al fine di chiarirne il ruolo rispetto alla taratura dei regolatori sviluppata nella presente tesi.

5.1.1 Screening dei Modelli Lineari Classici (Attività Pregressa)

Nella fase preliminare di laboratorio [1] era stata esplorata una griglia di oltre **11 000 configurazioni parametriche** di modelli lineari a tempo discreto, confrontando le principali famiglie a parametri concentrati (ARX, ARMAX, Output-Error, Box-Jenkins e modelli nello spazio di stato N4SID di ordine 8).

La Tabella 5.1 riassume i risultati ottenuti sui migliori modelli candidati valutati durante tale analisi preliminare [1].

Tabella 5.1: *Sintesi dei risultati dell'identificazione data-driven per l'anello di rollio derivati dal lavoro preliminare di laboratorio [1].*

Classe di Modello	**Ordine Modello**	**Fit Predizione**	**Stabilità Simulata**
ARX (MISO)	$na = 4, nb = [2, 2]$	91.2%	Divergente a lungo termine
ARMAX (MISO)	$na = 3, nb = [2, 2], nc = 2$	88.5%	Scarsa reiezione rumore
Box-Jenkins	$nb = [3, 3], nc = 2, nd = 2$	85.0%	Troppo sensibile ai disturbi
State-Space (N4SID)	$nx = 8$	90.5%	Accettabile, ma complessa

Sebbene alcune strutture ARX a ingressi multipli (MISO) raggiungessero indici di adattamento (*fit*) elevati sulla predizione ad un passo (validSIM $\approx 90 \div 91\%$), l'analisi dei regressori aveva evidenziato che tali prestazioni dipendevano dall'utilizzo delle misure istantanee di *roll-rate* ($\dot{\phi}$) e *yaw-rate* ($\dot{\psi}$) come ingressi ausiliari. Quando impiegati in simulazione libera (*input-only*), ossia guidati esclusivamente dai comandi di attuazione, la capacità predittiva su orizzonti prolungati si riduceva sensibilmente, manifestando derive numeriche.

5.1.2 Il Modello Ibrido Fisico-Cinematico + NARX Polinomiale

Per migliorare la capacità di simulazione su orizzonte multi-passo, nel medesimo lavoro preliminare [1] era stato formulato un **modello a scatola grigia** composto da un *backbone cinematico* esplicito affiancato a una regressione polinomiale non lineare di tipo **NARX** (*Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs*).

La propagazione dell'angolo di rollio $\hat{\phi}[k+1]$ segue l'integrazione cinematica discreta:

$$\hat{\phi}[k+1] = \phi[k] + T_s \cdot \dot{\phi}[k] \tag{5.1}$$

mentre l'evoluzione delle velocità angolari $\dot{\phi}$ e $\dot{\psi}$ è descritta da una regressione NARX polinomiale multi-output regolarizzata (ordini $n_a = 3$, $n_b = 2$, $n_k = 1$, grado polinomiale 2 con regolarizzazione Ridge $\lambda = 0.1$, per un totale di 171×2 coefficienti stimati), che aveva conseguito un indice di predizione ad un passo (PRED1 overall) del 95.43% e un'accuratezza di simulazione libera sul rollio (SIM roll) dell'81.80% [1].

Sulla linearizzazione locale di tale modello attorno alla verticale ($\phi = 0°$), era stata verificata in simulazione numerica una legge preliminare di tipo PD:

$$u_{steer}[k] = 0.12 \cdot e_{\phi}[k] - 0.75 \cdot \dot{\phi}[k] \tag{5.2}$$

5.1.3 Ruolo della Modellazione rispetto alla Sintesi e alla Taratura dei Regolatori

È importante precisare in quale misura i modelli descritti nel Capitolo 3 e nella presente sezione siano intervenuti nella progettazione del sistema di controllo implementato in questa tesi:

1. **Inquadramento strutturale e qualitativo**: il modello fisico del pendolo inverso con controsterzo (Sezione 3) e l'analisi del modello ibrido NARX [1] hanno fornito la giustificazione strutturale per l'adozione di un regolatore PD sull'anello interno di rollio, evidenziando come la presenza di poli instabili a bassa velocità renda indispensabile un'azione derivativa $\dot{\phi}$ di smorzamento affiancata all'azione proporzionale di richiamo;

2. **Limiti del modello per la sintesi diretta**: il modello NARX identificato in precedenza non è stato utilizzato per calcolare analiticamente i guadagni finali né per dimostrare formalmente la stabilità in anello chiuso del prototipo

aggiornato. I guadagni preliminari di Eq. (5.2) ($K_p = 0.12$, $K_d = 0.75$), trasferiti direttamente sulla bicicletta reale dopo la riprogettazione del firmware con comando diretto in tensione e il riposizionamento dell'elettronica, risultavano infatti sottodimensionati sul termine proporzionale e sovrasmorzati sul termine derivativo rispetto alle effettive rigidezze e agli attriti del motoriduttore;

3. **Taratura sperimentale dei guadagni finali**: i parametri definitivi adottati nel firmware per i tre anelli ($K_{p,roll} = 0.27\,\mathrm{V/deg}$ e $K_{d,roll} = 0.32\,\mathrm{V/(deg/s)}$ per il rollio; $K_{p,trac} = 5.0$, $K_{i,trac} = 4.0$ e $K_{FF} = 3.8$ per la trazione; $K_{p,yaw} = 0.015$ per lo yaw rate) costituiscono un contributo sviluppato interamente nella presente tesi mediante campagne di taratura sperimentale diretta sul prototipo fisico, utilizzando la legge di Eq. (5.2) unicamente come punto di partenza qualitativo iniziale.

5.2 Compensazione Sperimentale dell'Offset di Rollio

Durante il trasferimento del controllore sulla bicicletta fisica, le prime prove di marcia hanno evidenziato una criticità sistematica: pur con l'anello di rollio attivo e riferimento nullo ($\phi_{ref} = 0°$), il veicolo manifestava una tendenza asimmetrica a inclinare e cadere sempre verso il medesimo lato.

L'analisi sperimentale ha ricondotto tale comportamento alla presenza di un **offset di rollio complessivo** (ϕ_{offset}) tra lo zero letto dal sensore inerziale BNO055 e l'angolo di inclinazione corrispondente all'effettivo equilibrio gravitazionale del veicolo. Fisicamente, tale scostamento è la somma di due contributi:

1. **Una componente geometrica di montaggio (ϕ_{geom})**: dovuta all'inclinazione residua della staffa di supporto dell'IMU rispetto al piano geometrico longitudinale del telaio;

2. **Una componente fisica baricentrica (ϕ_{bar})**: legata alla distribuzione non perfettamente simmetrica delle masse aggiunte a bordo (pacco batterie LiPo, scatola dell'elettronica e cablaggi). Poiché il baricentro complessivo G presenta un lieve eccentricità laterale rispetto al piano passante per i punti di contatto delle ruote, la configurazione di equilibrio instabile (in cui la proiezione di G cade sulla linea di appoggio a terra) si realizza a un angolo geometrico non nullo.

5.2.1 Procedura Sperimentale di Identificazione dell'Offset

Poiché il sensore IMU misura l'inclinazione complessiva senza poter separare ϕ_{geom} da ϕ_{bar}, il valore operativo di ϕ_{offset} è stato determinato in due fasi: la componente geometrica è stata misurata con un riferimento esterno, mentre quella fisica è stata individuata sperimentalmente a partire da essa:

1. **Misura dell'offset geometrico mediante sistema di *motion capture***: la bicicletta è stata posizionata al centro di un laboratorio attrezzato con telecamere per l'acquisizione del movimento, appoggiata sulla rotella di supporto. In tale configurazione statica è stata registrata la lettura di rollio dell'IMU e, contemporaneamente, la posizione di tre marker riflettenti solidali al telaio, dalla quale è stato possibile ricostruire matematicamente l'inclinazione reale del veicolo. L'offset geometrico ϕ_{geom} è stato ottenuto come differenza tra la lettura dell'IMU e l'inclinazione ricostruita dai marker nello stesso istante;

2. **Individuazione dell'offset fisico mediante prove di marcia in solo rollio**: a partire da ϕ_{geom} e fissata la disposizione meccanica finale dei componenti, sono state eseguite prove ripetute di lancio a velocità costante ($v_{ref} = 2.0\,\mathrm{m/s}$) con il solo anello PD di rollio attivo ($K_{p,yaw} = 0$, $\phi_{ref} = 0°$), variando il parametro ϕ_{offset} tramite l'interfaccia MATLAB a passi di $0.05°$ nell'intervallo $[2.20°, 2.35°]$. Per ciascun valore candidato sono stati valutati a posteriori nei log telemetrici: (i) la direzione di eventuale caduta o deriva sistematica; (ii) il valore medio e la simmetria delle escursioni della tensione di sterzo $V_{steer}(t)$ tra correzioni a destra e a sinistra; (iii) la durata del mantenimento autonomo dell'equilibrio.

Tale procedura ha permesso di individuare l'intervallo operativo ottimale in $\phi_{offset} \in [2.25°, 2.30°]$ ($2.30°$ nella sessione di validazione del solo rollio e $2.25°$ nella sessione integrata con anello di imbardata). Nel firmware (`bno055.c`), il valore di calibrazione viene applicato in virgola mobile (`float`) alla lettura del sensore:

$$\phi_{eff}[k] = \phi_{raw}[k] - \phi_{offset} \tag{5.3}$$

Come discusso nel Capitolo 6, variazioni di ϕ_{offset} dell'ordine di $0.05° \div 0.10°$ (conseguenti ad esempio alla rimozione e al riposizionamento della batteria per la ricarica), unitamente a eventuali asimmetrie dell'angolo meccanico di sterzo, influenzano sensibilmente il punto di lavoro laterale del veicolo.

5.3 Taratura del Regolatore PD di Rollio

Tra gli anelli del sistema, il **PD di Rollio** riveste un ruolo centrale: se l'equilibrio laterale non è garantito, la bicicletta cade entro poche frazioni di secondo e qualunque regolazione della velocità o della rotta risulta inutile.

5.3.1 Scelta del Pilotaggio Diretto in Tensione

Il regolatore di rollio genera direttamente la tensione di comando V_{steer} applicata al driver Cytron per azionare il motore di sterzo. Sebbene in un azionamento elettrico generale un anello interno di corrente ad ampia banda passante costituisca la soluzione canonica per imporre la coppia elettromagnetica, sul prototipo in esame la ridotta

induttanza del motore Maxon DCX35L ($L = 0.0774\,\text{mH}$ e resistenza di armatura $R = 0.212\ \Omega$, da specifiche di targa [8]) determina una costante di tempo elettrica dell'avvolgimento ($\tau_e = L/R \approx 0.36\,\text{ms}$) trascurabile rispetto alle costanti di tempo meccaniche del veicolo e al periodo di campionamento ($T_s = 10\,\text{ms}$).

Inoltre, nei precedenti lavori svolti sulla medesima piattaforma [4], la specifica implementazione dell'anello di corrente – basata sul sensore analogico ACS712 campionato a 100 Hz e abbinata a filtri passa-basso o di Kalman per attenuarne il rumore – aveva introdotto ritardi di fase (*phase lag*) tali da ridurre i margini di stabilità dell'anello di rollio e innescare oscillazioni divergenti. Pur senza escludere che un anello di corrente a frequenza più alta possa funzionare stabilmente, sul prototipo il **pilotaggio diretto in tensione** ha risolto il problema alla radice, eliminando i ritardi di fase dovuti ai filtri. La legge di controllo implementata (`PID_Compute_RollWithGyro` in `pid.c`) è di tipo proporzionale-derivativo:

$$V_{steer}[k] = K_{p,roll} \cdot (\phi_{ref}[k] - \phi[k]) - K_{d,roll} \cdot \dot{\phi}_{gyro}[k] \tag{5.4}$$

Per agevolare la lettura dei tracciati telemetrici del Capitolo 6, la Tabella 5.2 riassume la corrispondenza tra l'assetto fisico del telaio (Sezione 3.1), la variabile software $V_{steer}[k]$ registrata nei log per $\phi_{ref} = 0°$ ($V_{steer} = -K_{p,roll}\phi - K_{d,roll}\dot{\phi}_{gyro}$) e la rotazione fisica del manubrio δ prodotta dall'inversione di polarità del driver hardware (`SEGNO_MOT_STERZO = -1` in `motor.c`).

Tabella 5.2: *Riepilogo delle convenzioni di segno per l'anello di bilanciamento laterale ($\phi_{ref} = 0°$).*

Perturbazione Telaio	**Rollio ϕ, $\dot{\phi}$**	**Log Software V_{steer}**	**Azione Fisica Manubrio (`SEGNO_MOT = -1`)**
Inclinazione a **sinistra**	$\phi > 0$, $\dot{\phi} > 0$	$V_{steer} < 0$	Sterzata fisica a **sinistra** ($\delta > 0$, controsterzo a sinistra)
Inclinazione a **destra**	$\phi < 0$, $\dot{\phi} < 0$	$V_{steer} > 0$	Sterzata fisica a **destra** ($\delta < 0$, controsterzo a destra)

La tensione di comando è saturata a $\pm 5.5\,\text{V}$ e il sensore ACS712 assicura la protezione anti-stallo descritta nella Sezione 4.3, azzerando l'uscita di sterzo al superamento della soglia di 5.0 A (con arresto d'emergenza se la condizione persiste per oltre 150 ms).

5.3.2 Accordo dei Guadagni Proporzionale e Derivativo

La taratura dei parametri di Eq. (5.4) è stata effettuata sperimentalmente sul prototipo seguendo una procedura progressiva:

- **Guadagno Proporzionale ($K_{p,roll} = 0.27$)**: fornisce la rigidezza elastica necessaria a richiamare il telaio verso la verticale. Valori inferiori a 0.20 rendono

la risposta pigra, consentendo alla gravità di vincere l'inerzia e far cadere il mezzo; valori superiori a 0.35 innescano violente vibrazioni ad alta frequenza. Il valore ottimale $K_{p,roll} = 0.27$ garantisce il compromesso tra prontezza e stabilità;

- **Azione Derivativa di Smorzamento ($K_{d,roll} = 0.32$)**: svolge un ruolo determinante nella stabilizzazione. Agendo direttamente sulla velocità angolare fornita dal giroscopio ($\dot{\phi}_{gyro}$), il termine derivativo genera un'azione smorzante proporzionale alla rapidità di caduta, frenando l'oscillazione e impedendo che il telaio oltrepassi la verticale durante il recupero (*overshoot*). L'utilizzo diretto della misura giroscopica elimina i ritardi e l'amplificazione del rumore tipici della derivazione numerica dell'errore;

- **Azione Integrale ($K_{i,roll} = 0$)**: la componente integrale è stata deliberatamente esclusa. A causa della dinamica a fase non minima del controsterzo, l'introduzione di un polo nell'origine ridurrebbe il margine di fase favorendo cicli limite a bassa frequenza. Gli errori di orientamento stazionario vengono compensati tramite la taratura dell'offset di rollio ϕ_{offset}.

5.4 Taratura del Controllo di Trazione (Velocità)

Il controllo della velocità di avanzamento è indispensabile per mantenere la bicicletta nel punto di lavoro per cui i controllori di sterzo sono stati tarati. Specializzando la struttura generale della Sezione 3.6 (Eq. (3.5)–(3.7)) con $K_{d,trac} = 0$, la tensione non saturata richiesta al motore di trazione è data dalla legge PI con Feed-Forward:

$$V_{trac,unsat}[k] = K_{FF} \cdot v_{ref}[k] + K_{p,trac} \cdot e_v[k] + I_{v,prov}[k] \tag{5.5}$$

dove $I_{v,prov}[k] = I_v[k-1] + K_{i,trac} T_s e_v[k]$ e lo stato integrale $I_v[k]$ viene aggiornato ad ogni passo ($T_s = 0.01\,\text{s}$) mediante la compensazione anti-windup a retrocalcolo:

$$I_v[k] = I_{v,prov}[k] + K_{b,trac}\, T_s\, (V_{trac,sat}[k] - V_{trac,unsat}[k]) \tag{5.6}$$

I parametri identificati e validati sono:

- **Guadagno di Feed-Forward ($K_{FF} = 3.8\,\mathbf{V/(m/s)}$)**: fornisce istantaneamente la tensione richiesta per vincere la forza elettromotrice inversa e gli attriti di trascinamento a regime, garantendo una risposta rapida ai gradini di velocità;

- **Guadagno Proporzionale ($K_{p,trac} = 5.0$)**: interviene per assorbire le deviazioni transitorie durante l'avvio;

- **Guadagno Integrale ($K_{i,trac} = 4.0$)**: assicura l'azzeramento dell'errore a regime stazionario, compensando pendenze del terreno e variazioni del carico utile;
- **Anti-Windup ($K_{b,trac} = 1.0$)**: combinato con il clamping della tensione nell'intervallo $[0, 11.5]\,\mathrm{V}$, impedisce che l'integratore accumuli cariche eccessive durante la fase iniziale di accelerazione.

5.5 Taratura dell'Anello Esterno di Yaw Rate

L'anello esterno riceve il riferimento di velocità angolare di imbardata $\dot{\psi}_{ref}$ e calcola l'angolo di rollio di riferimento ϕ_{ref} per l'anello interno di stabilizzazione.

5.5.1 Taratura Conservativa dell'Anello di Imbardata e Limiti di Autorità

Nel firmware (`control.c`), l'uscita del blocco proporzionale di imbardata viene invertita di segno al momento dell'assegnazione al riferimento di rollio (`roll_ref = -PID_Compute(&pid_yaw, ref_yaw_rate, imu.yaw_rate_dps)`) e il guadagno operativo è impostato al valore negativo $K_{p,yaw}^{(fw)} = -0.015\,\mathrm{deg/(deg/s)}$ ($K_{i,yaw} = K_{d,yaw} = 0$). La combinazione della doppia inversione algebrica realizza la legge di retroazione negativa:

$$\phi_{ref}[k] = -K_{p,yaw}^{(fw)} \cdot \left(\dot{\psi}_{ref}[k] - \dot{\psi}_{meas}[k]\right) = +|K_{p,yaw}| \cdot \left(\dot{\psi}_{ref}[k] - \dot{\psi}_{meas}[k]\right) \quad (5.7)$$

con $|K_{p,yaw}| = 0.015\,\mathrm{deg/(deg/s)}$. Tale relazione è fisicamente coerente con la convenzione di segno del Capitolo 3 ($\phi > 0$ inclinazione a sinistra, $\dot{\psi} > 0$ rotazione antioraria verso sinistra): a fronte di un riferimento rettilineo ($\dot{\psi}_{ref} = 0$), una deriva verso destra ($\dot{\psi}_{meas} < 0$, ossia errore $e_{\dot{\psi}} > 0$) genera un riferimento di rollio positivo ($\phi_{ref} > 0$, inclinazione verso sinistra) che si oppone alla sterzata; viceversa, una deviazione verso sinistra ($\dot{\psi}_{meas} > 0$, $e_{\dot{\psi}} < 0$) impone un riferimento negativo ($\phi_{ref} < 0$, inclinazione verso destra).

La taratura sperimentale ha condotto alla scelta di un guadagno statico ridotto, $|K_{p,yaw}| = 0.012 \div 0.020\,\mathrm{deg/(deg/s)}$ (con valore finale 0.015 nelle prove del Capitolo 6), motivato dai seguenti fattori:

- Un guadagno proporzionale elevato trasmette con forte amplificazione all'anello interno le oscillazioni fisiologiche di imbardata indotte dal controsterzo (*weave*), provocando un accoppiamento destabilizzante tra gli anelli in cascata;
- Poiché un controllore puramente proporzionale costituisce un guadagno statico (e non introduce di per sé un filtraggio dinamico in frequenza), il disaccoppiamento tra i due anelli è ottenuto riducendo l'ampiezza del guadagno $|K_{p,yaw}|$ così da contenere la banda passante dell'anello esterno e limitare l'ampiezza delle variazioni di ϕ_{ref} trasmesse all'anello di rollio;

- L'uscita ϕ_{ref} è inoltre vincolata entro una saturazione di sicurezza $\pm\phi_{max} = \pm 2.5°$, al fine di evitare che richieste di manovra elevate impongano angoli di piega incompatibili con l'aderenza e l'autorità dell'attuatore di sterzo;

- Come conseguenza diretta di tale taratura conservativa e dell'assenza di azione integrale ($K_{i,yaw} = 0$), l'autorità correttiva stazionaria dell'anello di yaw rate risulta limitata: uno scostamento di velocità angolare dell'ordine di $15 \div 20°/s$ genera infatti una correzione sul riferimento di rollio di appena $0.22° \div 0.30°$, grandezza insufficiente a compensare sbilanciamenti di coppia o disallineamenti dello sterzo (discussi nella Sezione 6.4). Va notato che questo errore stazionario riguarda solo la *regolazione locale della velocità di imbardata* – per la quale il microcontrollore dispone già della misura IMU $\dot{\psi}_{meas}$ e che potrebbe essere corretta a livello embedded con un termine integrale o il controllo dell'angolo di sterzo – ed è un problema diverso dal *controllo della traiettoria cartesiana* (X, Y, ψ), che richiede invece una stima di posa globale affidata al livello superiore.

Capitolo 6

Risultati Sperimentali a Ciclo Chiuso

6.1 Metodologia Sperimentale e Ripartizione dei Test

I test di validazione sperimentale del prototipo di bicicletta elettrica autonoma sono stati condotti seguendo una metodologia di collaudo modulare. In accordo con l'architettura gerarchica teorizzata nel Capitolo 3 e tarata nel Capitolo 5, le prove sperimentali sono state strutturate in tre fasi indipendenti e sequenziali, mirate a isolare e validare progressivamente i singoli gradi di libertà del veicolo prima della loro integrazione a ciclo chiuso completo.

La prima fase di test ha riguardato il controllo di trazione, con l'isolamento della catena di propulsione e lo sterzo inibito ($V_{steer} = 0\,\mathrm{V}$), per quantificare la prontezza di risposta, la stabilità a regime e l'efficacia del compensatore Feed-Forward unito all'algoritmo di Anti-Windup con Back-Calculation sul motore DC di trazione.

Successivamente, il secondo step ha focalizzato l'attenzione sulla stabilizzazione dell'assetto laterale (controllo del solo rollio). Durante queste prove di bilanciamento, mantenendo attiva la trazione ma escludendo l'anello esterno di imbardata ($K_{p,yaw} = 0$), è stato possibile valutare la dinamica reattiva di controsterzo dell'anello PD, determinare empiricamente l'offset complessivo di rollio (ϕ_{offset}) e verificare l'efficacia del monitoraggio delle correnti tramite il sensore ACS712.

Infine, l'ultima fase ha testato il controllo coordinato a tre anelli attivi, integrando il controllo di trazione, il rollio e la regolazione di yaw rate. Questa prova di marcia autonoma ha permesso di analizzare le oscillazioni tra rollio e yaw rate e di ricostruire la traiettoria sul piano orizzontale tramite odometria.

Le grandezze fisiche analizzate nei paragrafi seguenti sono campionate ed elaborate in tempo reale alla frequenza costante di $100\,\mathrm{Hz}$ ($T_s = 10\,\mathrm{ms}$) dal core Cortex-M4 del microcontrollore STM32H745ZI, che provvede contestualmente all'invio dei pacchetti telemetrici su linea seriale a $921\,600$ baud. Come dettagliato nella Sezione 6.4, la registrazione su file eseguita lato PC dall'interfaccia grafica MATLAB opera invece a una frequenza media effettiva inferiore, dipendente dai tempi di gestione del buffer seriale e di aggiornamento grafico dell'ambiente host.

6.2 Test 1: Validazione del Controllo di Trazione (Solo Trazione)

La prima fase di test ha riguardato la regolazione della velocità di avanzamento longitudinale $v(t)$, misurata in tempo reale mediante l'elaborazione dei fronti dell'encoder ottico integrato nel motore di trazione. Per verificare le prestazioni dinamiche dell'anello longitudinale in assenza di azioni trasversali dello sterzo, l'attuatore anteriore è stato mantenuto disattivato imponendo $V_{steer} = 0.0\,\mathrm{V}$.

I parametri del regolatore di trazione validati durante questa campagna sperimentale sono:

- Guadagno proporzionale: $K_{p,trac} = 5.000\,\mathrm{V/(m/s)}$;
- Guadagno integrale: $K_{i,trac} = 4.000\,\mathrm{V/(m/s{\cdot}s)}$;
- Guadagno di Feed-Forward lineare: $K_{FF} = 3.800\,\mathrm{V/(m/s)}$;
- Costante di Back-Calculation Anti-Windup: $K_{b,trac} = 1.0$;
- Durata della rampa di accelerazione Soft-Start: $T_{ramp} = 1.00\,\mathrm{s}$;
- Limite di saturazione della tensione di comando: $V_{trac} \in [0, 11.5]\,\mathrm{V}$.

La risposta del sistema a variazioni del setpoint di velocità è illustrata in Figura 6.1, che documenta tre prove condotte con la bicicletta a terra, sottoposta all'intero peso proprio del veicolo e ai relativi attriti di rotolamento e trasmissione, imponendo rispettivamente riferimenti di $1.0\,\mathrm{m/s}$, $1.5\,\mathrm{m/s}$ e $2.0\,\mathrm{m/s}$ (accompagnando manualmente il mezzo per il solo sostegno verticale a sterzo disabilitato).

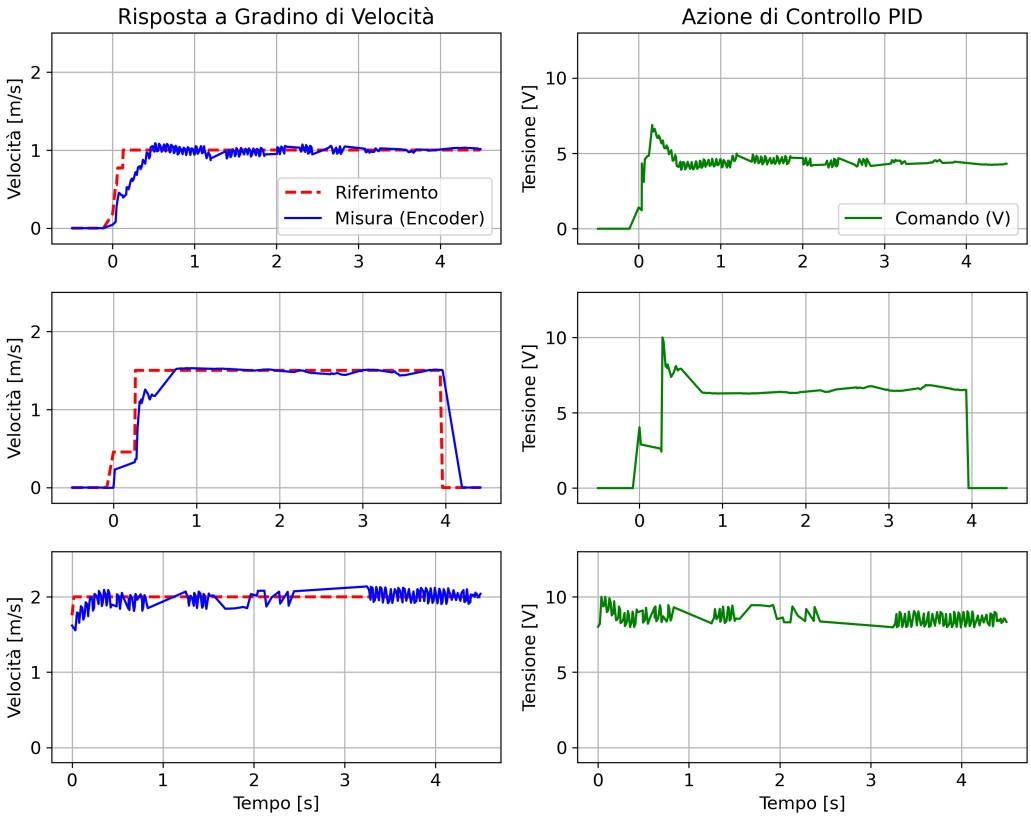


Figura 6.1: *Risposta del controllo di trazione per tre setpoint di velocità distinti (1.0 m/s, 1.5 m/s e 2.0 m/s) nelle prove di avanzamento a terra. A sinistra: inseguimento della velocità lineare misurata dall'encoder rispetto al riferimento; a destra: profilo di tensione erogato dal driver Cytron MD10C.*

Nell'interpretare il transitorio iniziale delle prove a 1.0 m/s e 1.5 m/s in Figura 6.1, si osserva che i profili tracciati riportano il gradino del setpoint comandato e la corrispondente risposta dinamica dell'anello PI con Feed-Forward (mentre nel funzionamento autonomo integrato il firmware applica in aggiunta una rampa di *soft-start* di durata $T_{ramp} = 1.00\,\text{s}$ per graduare lo spunto alla partenza): il tempo di assestamento osservato (nell'ordine di $0.8 \div 1.0\,\text{s}$) riflette l'inerzia longitudinale del veicolo a terra e la prontezza del regolatore, il quale converge al riferimento senza sovraelongazioni apprezzabili grazie al contributo di Feed-Forward e dell'anti-windup, mantenendo a regime un errore medio pressoché nullo ($\leq 0.01\,\text{m/s}$, con deviazione standard $\sigma_v \approx 0.01\,\text{m/s}$ su finestre stabilizzate di 3.50 s e 2.90 s). Nella prova a 2.0 m/s (analizzata su una finestra a regime di 5.88 s, dove si registrano media $\bar{v} = 2.07\,\text{m/s}$, deviazione standard $\sigma_v = 0.08\,\text{m/s}$ ed escursioni tra 1.87 e 2.21 m/s), il segnale mostra oscillazioni più accentuate accompagnate da una maggiore attività sul comando di tensione: tale comportamento è riconducibile alle vibrazioni della trasmissione a catena sotto carico, ai giochi meccanici del riduttore e alle irregolarità del contatto pneumatico-suolo alle velocità di rotazione più elevate.

6.3 Test 2: Stabilizzazione dell'Assetto Laterale (Solo Rollio)

La Figura 6.2 illustra il prototipo di bicicletta strumentata durante le sessioni sperimentali di collaudo.



Figura 6.2: *Il prototipo di bicicletta strumentata impiegato durante le sessioni sperimentali di collaudo dinamico all'aperto.*

La seconda fase ha riguardato la validazione dell'anello interno di bilanciamento laterale. Durante questi test, l'anello esterno di velocità di imbardata è stato disattivato ($K_{p,yaw} = 0$), imponendo direttamente all'anello PD di rollio il riferimento verticale costante $\phi_{ref} = 0°$.

I parametri operativi attivi nel firmware per questa configurazione sono:

- Guadagno proporzionale di rollio: $K_{p,roll} = 0.270\,\mathrm{V/deg}$;
- Guadagno derivativo di rollio: $K_{d,roll} = 0.320\,\mathrm{V/(deg/s)}$;
- Offset totale di rollio: $\phi_{offset} = 2.30°$ (identificato sperimentalmente per questa sessione secondo la procedura della Sezione 5.2.1);
- Limite di saturazione sterzo: $V_{steer} \in [-5.5, +5.5]\,\mathrm{V}$;
- Soglia limite di sovracorrente (ACS712): $I_{max} = 5.0\,\mathrm{A}$.

6.3.1 Dinamica Temporale e Risposta di Controsterzo

La Figura 6.3 illustra i profili temporali acquisiti durante una prova di marcia in avanti a velocità media $\bar{v} = 2.07\,\mathrm{m/s}$ ($v_{ref} = 2.0\,\mathrm{m/s}$) su una finestra attiva di 6.46 s (183 campioni registrati su PC per $v > 1.0\,\mathrm{m/s}$, pari al 28.3% dei circa 646 cicli eseguiti a 100 Hz dall'STM32 e con un complementare 71.7% di pacchetti

non memorizzati per le pause dell'interfaccia MATLAB, secondo la dinamica di acquisizione discussa nella Sezione 6.4): nel grafico superiore è riportato l'angolo di rollio calibrato ϕ, al centro la tensione di comando V_{steer} calcolata dal regolatore PD, e in basso la corrente istantanea assorbita dal motoriduttore di sterzo misurata dal sensore ACS712. Poiché in questa configurazione l'anello di imbardata è disabilitato ($K_{p,yaw} = 0$), la direzione di avanzamento sul piano non è vincolata e la prova mira esclusivamente a verificare il mantenimento dell'equilibrio verticale.

I profili acquisiti mostrano chiaramente il meccanismo di controsterzo attivo: in accordo con la legge (5.4) e con le convenzioni di segno riepilogate nella Tabella 5.2, per $\phi_{ref} = 0°$ ($V_{steer} = -K_{p,roll}\phi - K_{d,roll}\dot{\phi}_{gyro}$) la variabile software V_{steer} registrata in telemetria assume segno algebrico opposto all'angolo ϕ (con picchi compresi tra $-2.31\,\text{V}$ e $+2.64\,\text{V}$); grazie all'inversione di polarità del driver (`SEGNO_MOT_STERZO = -1`), ciò si traduce fisicamente in una coppia di sterzo concorde al verso di inclinazione, ruotando la forcella verso il lato di caduta per ricondurre l'impronta a terra sotto il baricentro.

Dal punto di vista quantitativo, nella finestra di marcia analizzata (6.46 s) l'angolo di rollio ϕ presenta un valore medio pari a $+0.78°$ (scostamento medio rispetto a $\phi_{ref} = 0°$ pari a $+0.78°$), una deviazione standard $\sigma_\phi = 1.38°$ e un valore efficace (RMS) pari a $1.58°$, con escursioni contenute nell'intervallo $[-1.70°, +2.61°]$. Il veicolo permane all'interno della fascia $\phi \in [-2°, +2°]$ per il 69.4% del tempo di marcia (mentre nel restante 30.6% del tempo l'oscillazione di controsterzo supera $\pm 2°$, restando comunque per il 100.0% dei campioni entro la fascia $[-3°, +3°]$).

La corrente assorbita dal motore di sterzo rimane confinata tra $-0.90\,\text{A}$ e $+0.65\,\text{A}$, ben al di sotto della soglia di protezione di $5.0\,\text{A}$.

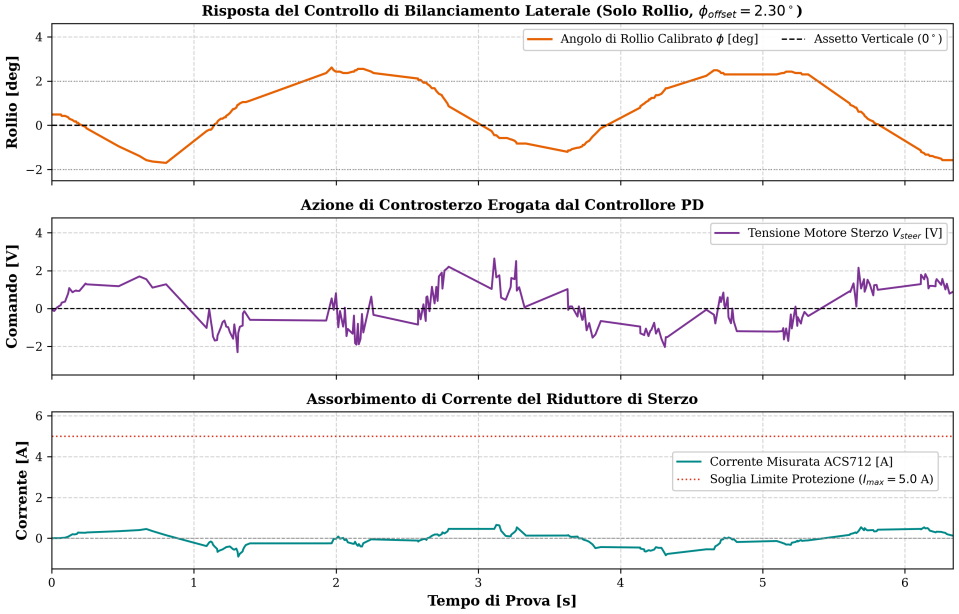


Figura 6.3: *Dinamica temporale del controllo di bilanciamento laterale in configurazione "Solo Rollio": angolo di rollio calibrato ϕ (in alto), tensione di controsterzo V_{steer} (al centro) e corrente assorbita dal motore di sterzo (in basso).*

6.4 Test 3: Controllo Coordinato di Imbardata (Yaw Rate e Rollio)

Nella terza fase di collaudo è stata attivata la catena di controllo a tre anelli per valutare congiuntamente la stabilizzazione dell'assetto e la regolazione della velocità di imbardata. L'anello esterno confronta la velocità angolare $\dot{\psi}$ misurata dal giroscopio con il riferimento desiderato ($\dot{\psi}_{ref} = 0°/\text{s}$), generando ad ogni passo il riferimento di inclinazione ϕ_{ref} per l'anello interno PD di rollio.

I parametri operativi registrati nel log telemetrico della prova sono:

- Guadagno proporzionale di imbardata: $|K_{p,yaw}| = 0.015\,\text{deg}/(\text{deg/s})$ (impostato come $K_{p,yaw}^{(fw)} = -0.015$ con inversione di segno in `control.c`, Eq. (5.7); $K_{i,yaw} = 0$);
- Limite di saturazione dell'angolo di piega di riferimento: $\phi_{ref} \in [-\phi_{max}, +\phi_{max}] = \pm 2.50°$;
- Guadagni anello interno di rollio: $K_{p,roll} = 0.270\,\text{V/deg}$, $K_{d,roll} = 0.320\,\text{V}/(\text{deg/s})$;
- Offset totale di rollio impostato per la sessione: $\phi_{offset} = 2.25°$;

- Guadagni anello di trazione: $K_{p,trac} = 5.0\,\mathrm{V/(m/s)}$, $K_{i,trac} = 4.0\,\mathrm{V/(m/s{\cdot}s)}$, velocità di riferimento $v_{ref} = 2.00\,\mathrm{m/s}$ (velocità media effettiva misurata nella finestra: $\bar{v} = 2.02\,\mathrm{m/s}$).

6.4.1 Campionamento a Bordo, Registrazione Telemetrica e Dinamica di Yaw Rate e Rollio

Poiché il file di acquisizione completo (9.60 s, 313 righe) include le fasi transitorie di avvio e di arresto finale, l'analisi quantitativa è condotta sulla finestra di marcia attiva stabilizzata di durata $\Delta T = 6.39\,\mathrm{s}$ ($t \in [2.81, 9.20]\,\mathrm{s}$, corrispondente a $N = 218$ campioni registrati).

Prima di esaminare l'andamento delle variabili di stato, è necessario distinguere il campionamento eseguito dal microcontrollore dalla registrazione dei dati impiegata per la validazione offline:

1. **Campionamento embedded vs registrazione MATLAB**: l'algoritmo di controllo a bordo dell'STM32H745 opera con cadenza deterministica a $f_s = 100\,\mathrm{Hz}$ ($T_s = 10\,\mathrm{ms}$) e trasmette un pacchetto telemetrico ad ogni ciclo. L'interfaccia grafica MATLAB su PC acquisisce e salva i pacchetti in modo asincrono: nella finestra di 6.39 s sono stati registrati 218 campioni (pari al 34.1% dei pacchetti trasmessi, corrispondenti a una frequenza media di memorizzazione di 34.1 Hz). L'analisi degli intervalli temporali $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ mostra tuttavia che il passo mediano tra campioni consecutivi è pari a 12.1 ms ($\approx 83\,\mathrm{Hz}$ durante i burst continui di lettura), ma sono presenti 14 pause di acquisizione di durata superiore a 100 ms (fino a un massimo di 322 ms), imputabili verosimilmente ai tempi di gestione del buffer seriale e di aggiornamento dei grafici nell'ambiente MATLAB;

2. **Campioni non registrati e utilizzo dei timestamp effettivi**: rispetto ai circa 639 cicli di controllo eseguiti a 100 Hz dal microcontrollore nell'intervallo di 6.39 s, circa 421 pacchetti ($\approx 65.9\%$) non sono stati memorizzati nel file di log. Per tenere conto della spaziatura non uniforme dei dati, tutte le elaborazioni temporali e le integrazioni odometriche sono state effettuate utilizzando i **timestamp effettivi** t_k (`Time_s`) associati a ciascun campione registrato;

3. **Effetto della riduzione di frequenza sulle metriche**: per quantificare l'impatto delle pause di registrazione, le medie campionarie aritmetiche sono state confrontate con le medie integrali pesate rispetto al tempo (metodo dei trapezi su Δt_k). Nella finestra considerata, la velocità media varia da 2.020 m/s (media campionaria) a 2.013 m/s (media pesata nel tempo), il rollio medio da $-0.90°$ a $-0.76°$ (con RMS da 1.92° a 1.87°) e lo yaw rate medio da $-16.91°/\mathrm{s}$ a $-16.54°/\mathrm{s}$ (con errore RMS praticamente invariato: 22.49°/s contro 22.51°/s). La perdita di campioni in fase di logging non altera pertanto le conclusioni sulle prestazioni di regolazione.

La Figura 6.4 riporta i profili temporali sincronizzati della velocità di imbardata $\dot{\psi}$, dell'angolo di rollio ϕ (con il relativo riferimento dinamico ϕ_{ref} generato dall'anello esterno) e della tensione di sterzo V_{steer} nella finestra analizzata.

Dall'esame dei dati emerge in primo luogo che la velocità di imbardata $\dot{\psi}(t)$ **non raggiunge un vero regime stazionario costante** nella finestra osservata: il segnale presenta infatti marcate oscillazioni comprese tra $-39.69°/s$ e $+15.69°/s$ (con deviazione standard $\sigma_{\dot{\psi}} = 14.82°/s$), sovrapposte a un valore medio fortemente negativo pari a $\bar{\dot{\psi}} = -16.91°/s$ e a un errore efficace rispetto al riferimento nullo ($\dot{\psi}_{ref} = 0°/s$) pari a $\text{RMS}(e_{\dot{\psi}}) = 22.49°/s$. Una deviazione di questa entità mostra chiaramente che le **prestazioni dell'anello esterno di yaw rate non sono sufficienti** nella configurazione attuale.

L'analisi quantitativa dei segnali consente di chiarire le cause fisiche e progettuali di tale comportamento:

- **Segno correttivo ma ridotta autorità del guadagno proporzionale**: a fronte della deriva media verso destra ($\bar{\dot{\psi}} = -16.91°/s$), la legge di retroazione negativa (5.7) con $|K_{p,yaw}| = 0.015\,\text{deg}/(\text{deg/s})$ comanda un riferimento di rollio positivo (inclinazione correttiva verso sinistra) pari in media a $\bar{\phi}_{ref} = +0.015 \cdot (0 - (-16.91)) \approx +0.25°$ (con picchi istantanei fino a $+0.60°$, traccia tratteggiata nel pannello centrale di Figura 6.4). Benché il segno dell'azione sia correttamente opposto alla deriva ($\bar{\phi}_{ref} = +0.25°$ contro un'inclinazione media effettiva $\bar{\phi} = -0.90°$), la sua ampiezza è un ordine di grandezza inferiore alla soglia di saturazione software ($\pm 2.50°$). Ciò dimostra che l'errore residuo non è dovuto alla saturazione di ϕ_{ref}, bensì alla debole autorità statica del regolatore proporzionale;

- **Deriva dell'angolo meccanico di sterzo δ e assenza di azione integrale**: poiché il regolatore di imbardata è privo di termine integrale ($K_{i,yaw} = 0$), esso non può annullare a regime gli sbilanciamenti costanti. Oltre alla sensibilità alla calibrazione dell'offset di equilibrio ϕ_{offset} ($0.05° \div 0.10°$) e alle condizioni di rilascio manuale, una causa fisica rilevante è individuabile nella **deriva dell'angolo meccanico di sterzo** δ, non misurato a bordo perché l'encoder di sterzo non è stato utilizzato: poiché il motoriduttore ($66 : 1$) è pilotato direttamente in tensione senza anello di posizione angolare, la velocità di sterzata è approssimativamente proporzionale alla tensione ($\dot{\delta} \propto V_{steer}$) e l'attuatore agisce come un integratore meccanico. Qualsiasi disallineamento iniziale del manubrio al lancio manuale, gioco meccanico o asimmetria del fondo stradale si integra in un angolo di sterzo medio $\bar{\delta} \neq 0$ che induce una velocità di imbardata media non nulla, senza che il debole guadagno proporzionale esterno riesca a compensarla;

- **Accoppiamento con il modo di *weave***: l'escursione oscillatoria di $\dot{\psi}$ ($\sigma_{\dot{\psi}} = 14.82°/s$) è direttamente indotta dalle manovre periodiche di controsterzo

con cui l'anello interno stabilizza il rollio.

Per quanto riguarda l'assetto laterale, l'angolo di rollio calibrato ϕ oscilla nell'intervallo $[-3.62°, +1.88°]$, con valore medio $-0.90°$, deviazione standard $\sigma_\phi = 1.69°$ e valore efficace rispetto alla verticale $\mathrm{RMS}(\phi) = 1.92°$ (mentre l'errore rispetto al riferimento dinamico $\phi_{ref}(t)$ ha media $\bar{e}_\phi = -1.15°$ e valore efficace $\mathrm{RMS}(\phi - \phi_{ref}) = 1.80°$). Il telaio permane entro la fascia $\pm 2°$ per il 70.6% del tempo di marcia ed entro $\pm 3°$ per l'80.3% del tempo (superando pertanto $\pm 2°$ nel restante 29.4% della finestra durante i picchi di controsterzo). La tensione di sterzo V_{steer} varia tra $-3.20\,\mathrm{V}$ e $+2.88\,\mathrm{V}$ (corrente compresa tra $-0.64\,\mathrm{A}$ e $+1.39\,\mathrm{A}$), mantenendosi lontana dal limite di saturazione ($\pm 5.5\,\mathrm{V}$) e confermando che l'anello interno PD previene la caduta del prototipo.

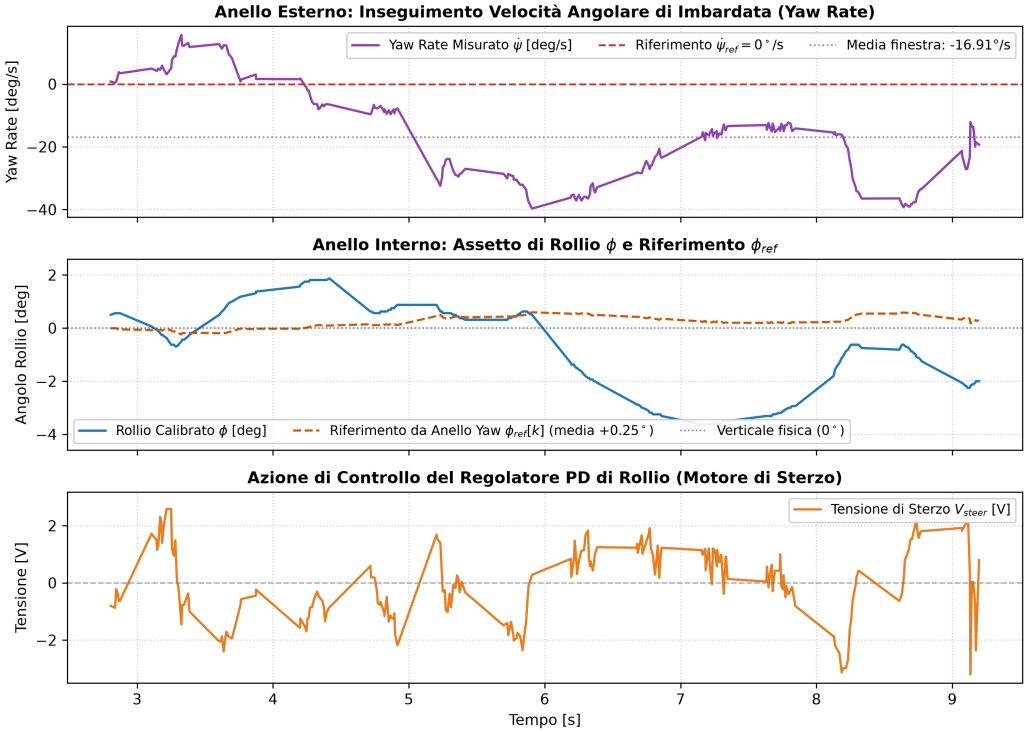


Figura 6.4: *Risposta dinamica sincronizzata del controllo coordinato di imbardata e rollio: velocità di imbardata $\dot{\psi}$ (in alto), angolo di rollio ϕ confrontato con il riferimento ϕ_{ref} generato dall'anello esterno (al centro) e tensione di comando dello sterzo V_{steer} (in basso).*

6.4.2 Ricostruzione Odometrica Qualitativa e Distinzione tra Controllo di Yaw Rate e Controllo della Traiettoria

Al fine di visualizzare l'effetto spaziale dello scostamento di imbardata discusso nel paragrafo precedente, i segnali di velocità longitudinale $v(t)$ e di velocità angolare $\dot{\psi}(t)$ sono stati integrati numericamente *offline* rispetto ai timestamp effettivi t_k,

ottenendo la stima qualitativa della traiettoria nel piano orizzontale (X, Y) riportata in Figura 6.5.

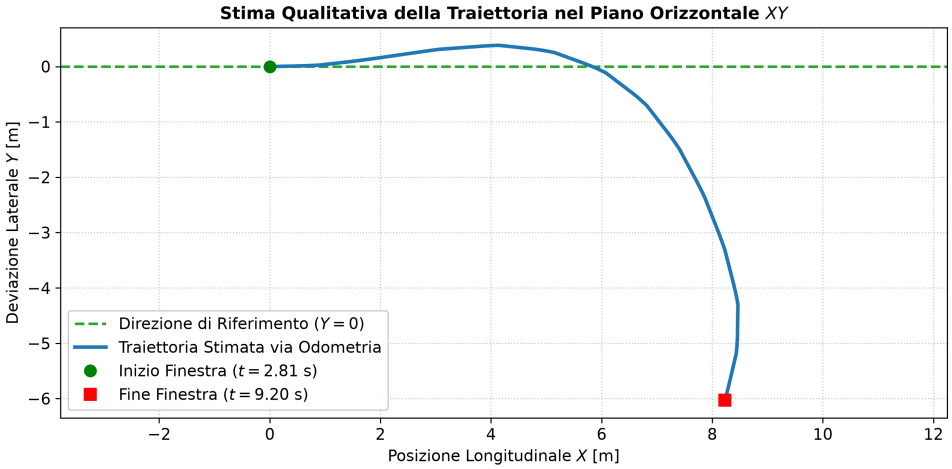


Figura 6.5: *Stima qualitativa della traiettoria nel piano orizzontale XY ottenuta mediante integrazione odometrica dei dati sperimentali nella finestra analizzata.*

Nell'interpretare il tracciato di Figura 6.5, è importante sottolineare che tale ricostruzione odometrica in anello aperto riveste una valenza puramente **qualitativa e illustrativa** dell'effetto spaziale della deriva di imbardata. Poiché la velocità angolare $\dot{\psi}(t)$ varia ampiamente nel tempo (tra $-39.69°/s$ e $+15.69°/s$) intorno al valore medio negativo ($-16.91°/s$), il percorso ricostruito non descrive una curva a curvatura costante, ma evidenzia visivamente un tratto iniziale più disteso seguito da una progressiva accentuazione della deviazione verso destra.

Sul piano dell'architettura di controllo, questo risultato consente di **distinguere nettamente il problema della regolazione dello yaw rate da quello del controllo della traiettoria**:

- **Regolazione dello yaw rate ($\dot{\psi}$)**: il microcontrollore STM32 dispone già a bordo della misura giroscopica $\dot{\psi}_{meas}$ fornita dall'IMU BNO055. Pertanto, in linea di principio, la compensazione di un errore stazionario di velocità angolare di imbardata **non richiede la conoscenza della posizione cartesiana del veicolo** e non dipende dalla presenza del controllore ad alto livello su NVIDIA Jetson. L'errore medio osservato nella prova ($-16.91°/s$) deriva invece dai limiti specifici della legge di controllo adottata a basso livello – segnatamente l'assenza di azione integrale ($K_{i,yaw} = 0$), il basso guadagno proporzionale ($|K_{p,yaw}| = 0.015$) imposto dal compromesso di stabilità con il modo di *weave*, il mancato utilizzo della misura dell'angolo meccanico di sterzo δ e la sensibilità alla taratura di ϕ_{offset}. Tali limiti possono essere affrontati direttamente a livello embedded (ad esempio attivando l'encoder già presente sul piantone di

sterzo, introducendo un'azione integrale a banda limitata con anti-windup o una stima adattativa dell'offset);

- **Controllo della traiettoria e della posa nel piano** (X, Y, ψ): anche qualora il regolatore embedded annullasse perfettamente l'errore medio di velocità angolare ($\dot{\psi} \to \dot{\psi}_{ref}$), qualsiasi disturbo transitorio (ad esempio durante la fase di spinta iniziale o il recupero da una perturbazione laterale) produrrebbe una deviazione integrata dell'angolo di orientamento $\psi(t) = \psi_0 + \int \dot{\psi}(\tau)\, d\tau$ e uno scostamento laterale permanente rispetto alla retta desiderata. Dato che controllare la traiettoria richiede di conoscere la posa globale del veicolo (X, Y, ψ) e il percorso da seguire, questo compito non può essere svolto dal controllore inerziale su STM32, ma deve essere affidato al modulo di navigazione ad alto livello (*High-Level Controller* su NVIDIA Jetson / ROS 2), incaricato di generare dinamicamente il riferimento $\dot{\psi}_{ref}(t)$ per annullare l'errore laterale (*cross-track error*).

6.5 Sintesi Quantitativa delle Prestazioni e Confronto Sperimentale

Per offrire un quadro valutativo ordinato e direttamente confrontabile delle prestazioni conseguite dai tre anelli di regolazione, la Tabella 6.1 riassume le metriche statistiche calcolate sulle rispettive finestre di regime (avanzamento a terra su finestre di 3.50 s, 2.90 s e 5.88 s per il Test 1; finestra attiva di 6.46 s con $\phi_{offset} = 2.30°$ per il Test 2; finestra attiva di 6.39 s con $|K_{p,yaw}| = 0.015$ e $\phi_{offset} = 2.25°$ per il Test 3). Per omogeneità di lettura, tutte le metriche dell'angolo di rollio ϕ sono riferite alla verticale nominale (0.00°).

Tabella 6.1: *Riepilogo quantitativo delle metriche sperimentali nei tre test di validazione a ciclo chiuso.*

Grandezza	**Rif.**	**Media**	**Scost.**	**Dev. std**	**RMS**(e)	**Min / Max**
Test 1 – Controllo di Trazione (prove a terra sotto carico)						
Velocità v [m/s]	1.00	1.00	0.00	0.01	0.01	[0.99, 1.01]
Velocità v [m/s]	1.50	1.50	0.00	0.01	0.01	[1.49, 1.52]
Velocità v [m/s]	2.00	2.07	+0.07	0.08	0.11	[1.87, 2.21]
Test 2 – Solo Rollio (anello di imbardata disattivato, finestra di 6.46 s)						
Velocità v [m/s]	2.00	2.07	+0.07	0.15	0.17	[1.02, 2.22]
Rollio ϕ [°]	0.00	+0.78	+0.78	1.38	1.58	[−1.70, +2.61]
Yaw rate $\dot{\psi}$ [°/s]	0.00	+3.36	+3.36	11.52	11.97	[−14.69, +24.56]
Test 3 – Rollio e Yaw Rate (controllo a tre anelli, finestra di 6.39 s)						
Velocità v [m/s]	2.00	2.02	+0.02	0.21	0.21	[0.93, 2.18]
Rollio ϕ [°]	0.00	−0.90	−0.90	1.69	1.92	[−3.62, +1.88]
Yaw rate $\dot{\psi}$ [°/s]	0.00	−16.91	−16.91	14.82	22.49	[−39.69, +15.69]

6.5.1 Confronto tra Anello Esterno di Yaw Rate Disattivato e Attivo

I dati raccolti consentono infine di confrontare il comportamento laterale del prototipo con anello esterno di imbardata disattivato (Test 2, $K_{p,yaw} = 0$) rispetto al caso con anello esterno attivo (Test 3, $|K_{p,yaw}| = 0.015$), come sintetizzato nella Tabella 6.2.

Tabella 6.2: *Confronto indicativo tra le prove di marcia con anello esterno di yaw rate disattivato (Test 2) e attivo (Test 3).*

Parametro / Metrica	**Yaw OFF (Test 2)**	**Yaw ON (Test 3)**	**Osservazioni**
Guadagno $\lvert K_{p,yaw}\rvert$ [deg/(deg/s)]	0.000	0.015	Legge puramente proporzionale ($K_{i,yaw} = 0$)
Offset di rollio ϕ_{offset} [°]	2.30°	2.25°	Differenza di 0.05° tra le due prove
Rollio medio $\bar{\phi}$ [°]	+0.78°	−0.90°	Inversione del segno dell'inclinazione media
Rollio RMS / σ_ϕ [°]	1.58° / 1.38°	1.92° / 1.69°	Lieve incremento della dispersione con cascata attiva
Tempo entro $\lvert\phi\rvert \leq 2°$ / $\leq 3°$	69.4% / 100%	70.6% / 80.3%	Circa il 30% del tempo oltre ±2° in entrambi i casi
Yaw rate medio $\bar{\dot{\psi}}$ [°/s]	+3.36°/s	−16.91°/s	Assenza di miglioramento sul valore medio stazionario
Errore RMS($e_{\dot{\psi}}$) [°/s]	11.97°/s	22.49°/s	Incremento dell'errore RMS nella prova con anello attivo

I dati mostrano che l'attivazione dell'anello esterno proporzionale **non ha ridotto l'errore medio né l'RMS di imbardata** rispetto alla prova in solo rollio (RMS($e_{\dot{\psi}}$) passa da 11.97°/s a 22.49°/s, e il valore medio da +3.36°/s a −16.91°/s). Questo risultato va però letto tenendo conto di due fattori:

1. **Prove singole non condotte a parità stretta di condizioni**: ciascuna configurazione è rappresentata da una singola finestra di marcia di circa 6.4 s e i due test sono stati acquisiti con due valori differenti del parametro di calibrazione dell'offset di rollio ($\phi_{offset} = 2.30°$ nel Test 2 contro $\phi_{offset} = 2.25°$ nel Test 3), oltre a risentire delle inevitabili differenze nelle condizioni iniziali di lancio manuale e nell'angolo iniziale del manubrio $\delta(t_0)$. Il confronto ha pertanto valore indicativo e non consente di isolare statisticamente il solo effetto del parametro $K_{p,yaw}$;

2. **Insufficienza dell'azione proporzionale rispetto alle asimmetrie di sterzo e di lancio**: come calcolato nella Sezione 6.4, la correzione media generata dall'anello di yaw rate ($\bar{\phi}_{ref} \approx +0.25°$) non è sufficiente a compensare la deriva indotta da un disallineamento medio dell'angolo di sterzo $\bar{\delta}$, da una variazione di $0.05°$ sull'offset di equilibrio o da una leggera asimmetria di rilascio. Ciò conferma che, mentre il controllore PD interno mantiene l'equilibrio verticale (con circa il 70% del tempo entro $\pm 2°$ in entrambe le configurazioni), un controllo efficace della velocità di imbardata richiede la misura dell'angolo di sterzo δ (encoder già presente ma non utilizzato) e l'inclusione di un'azione integrale controllata sull'anello esterno.

Capitolo 7

Conclusioni e Sviluppi Futuri

7.1 Sintesi dei Risultati Raggiunti

Il presente lavoro di tesi ha affrontato la progettazione, l'implementazione firmware embedded e la validazione sperimentale di un'architettura di controllo per la stabilizzazione dell'assetto e la regolazione della velocità di imbardata (*yaw rate*) di un prototipo di bicicletta elettrica autonoma.

Tenendo conto delle condizioni specifiche in cui si sono svolti i test, i risultati principali si possono riassumere nei seguenti punti:

- **Firmware Embedded su STM32H745**: è stata sviluppata ex novo un'architettura firmware modulare in linguaggio C eseguita sul core Cortex-M4 a 240 MHz del microcontrollore STM32H745ZI, con ciclo di controllo a 100 Hz ($T_s = 10\,\text{ms}$) cadenzato da interrupt timer hardware e supportato da periferiche DMA e timer in quadratura.

- **Architettura di Controllo a Tre Anelli Attivi**: è stato implementato uno schema gerarchico che abbina un anello interno PD di rollio con comando diretto in tensione sul motore di sterzo (soluzione risultata efficace sul prototipo per evitare i ritardi di fase dei filtri di corrente precedentemente sperimentati, mantenendo il sensore ACS712 per la protezione da sovracorrente), un anello esterno proporzionale di velocità di imbardata e un anello PI indipendente per la velocità longitudinale dotato di Feed-Forward e Anti-Windup con Back-Calculation.

- **Protocollo di Comunicazione Seriale e Sicurezza Operativa**: è stato realizzato un collegamento seriale binario a 921 600 baud conforme allo standard BFMC, provvisto di verifica CRC32 IEEE 802.3 e parser a finestra scorrevole su buffer circolare, unitamente a logiche di sicurezza fail-safe (watchdog di comunicazione a 2.5 s e soglia di cutoff per inclinazione eccessiva a $\pm 10.0°$) e a un'interfaccia MATLAB che ha sostituito parzialmente l'unità superiore per la telemetria e la taratura dei guadagni (senza tuttavia eseguire la pianificazione di traiettoria né la correzione in tempo reale del riferimento di imbardata).

- **Prestazioni Dimostrate e Limiti Emersi nelle Prove Sperimentali**:

1. *Regolazione di trazione*: nelle prove di avanzamento a terra (con il veicolo sottoposto al proprio peso e ai relativi attriti di rotolamento e trasmissione) per riferimenti di 1.0, 1.5 e 2.0 m/s, l'anello PI con Feed-Forward ha inseguito la rampa di *soft-start* ($T_{ramp} = 1.0\,\text{s}$) con errore medio a regime nullo per 1.0 e 1.5 m/s ($\text{RMS}(e_v) = 0.01\,\text{m/s}$) e pari a $+0.07\,\text{m/s}$ a 2.0 m/s ($\text{RMS}(e_v) = 0.11\,\text{m/s}$);
2. *Stabilizzazione dell'assetto di rollio*: nelle prove di marcia all'aperto a $v \approx 2.0 \div 2.1\,\text{m/s}$ su finestre stabilizzate di circa 6.4 s, il regolatore PD interno ha mantenuto l'equilibrio dinamico del prototipo prevenendo la caduta, contenendo l'angolo di rollio entro $\text{RMS}(\phi) = 1.58°$ ($\sigma_\phi = 1.38°$, 69.4% del tempo entro $\pm 2°$ e 100% entro $\pm 3°$) nella prova in solo rollio e $\text{RMS}(\phi) = 1.92°$ ($\sigma_\phi = 1.69°$, 70.6% entro $\pm 2°$) nella prova a tre anelli;
3. *Regolazione dello yaw rate vs controllo della traiettoria*: nel test integrato a tre anelli con riferimento $\dot{\psi}_{ref} = 0°/\text{s}$, la velocità di imbardata non ha raggiunto un regime stazionario costante, presentando un valore medio di $-16.91°/\text{s}$, escursioni tra $-39.69°/\text{s}$ e $+15.69°/\text{s}$ ed errore efficace $\text{RMS}(e_{\dot{\psi}}) = 22.49°/\text{s}$ (senza evidenziare un miglioramento rispetto alla prova con anello esterno disattivato, condotta tuttavia con un diverso offset di rollio). Tale deviazione attesta prestazioni di regolazione insufficienti dell'anello esterno di yaw rate, riconducibili alla ridotta autorità del guadagno proporzionale ($|K_{p,yaw}| = 0.015$, che genera una correzione media $\bar{\phi}_{ref} \approx +0.25°$), all'assenza di azione integrale ($K_{i,yaw} = 0$), alla probabile deriva dell'angolo meccanico di sterzo δ e alla sensibilità alle condizioni di lancio e all'offset ϕ_{offset}. Poiché il microcontrollore dispone già della misura IMU di $\dot{\psi}$, tale errore stazionario di velocità angolare può in linea di principio essere compensato a livello embedded, mentre il ricorso all'*High-Level Controller* (NVIDIA Jetson) risponde alla diversa esigenza strutturale di controllare la posa cartesiana (X, Y, ψ) e inseguire una traiettoria assegnata nello spazio.

7.2 Limitazioni dello Studio e della Validazione Sperimentale

Nell'analisi dei risultati vanno considerate alcune limitazioni emerse durante i collaudi sul prototipo:

- **Elevata sensibilità alle condizioni iniziali di avvio manuale**: poiché il veicolo non può autosostenersi a velocità nulla ed è privo di stabilizzatori meccanici retrattili, ciascuna prova richiede l'accompagnamento e il rilascio manuale da parte dell'operatore durante la rampa iniziale di accelerazione. Tale procedura introduce inevitabilmente condizioni iniziali non nulle e non perfettamente ripetibili sull'angolo di rollio $\phi(t_0)$, sulla velocità di rollio $\dot{\phi}(t_0)$, sull'angolo meccanico del manubrio $\delta(t_0)$ e sulla velocità di imbardata $\dot{\psi}(t_0)$.

Data la natura instabile in catena aperta del sistema, anche lievi asimmetrie nella spinta manuale di rilascio condizionano in modo significativo l'evoluzione del transitorio e la direzione di deriva nei secondi successivi;

- **Imperfezioni del manto stradale e disturbi ambientali all'aperto**: lo svolgimento dei test su pavimentazione esterna espone il prototipo a irregolarità del terreno. Sul piano dinamico, una pendenza trasversale anche minima del fondo stradale o una disomogeneità superficiale agiscono come un disturbo di coppia persistente sull'asse di rollio e sul piantone di sterzo, spostando il punto di equilibrio reale rispetto al parametro statico ϕ_{offset} calibrato a veicolo fermo e favorendo l'insorgere di una velocità di imbardata media non nulla;

- **Forte accoppiamento mutuo tra i parametri di taratura**: i diversi parametri dei regolatori ($K_{p,roll}$, $K_{d,roll}$, $K_{p,yaw}$, l'offset statico ϕ_{offset} e la velocità longitudinale di riferimento v_{ref}) non operano su sottosistemi disaccoppiati, ma risultano strettamente interdipendenti attraverso la dinamica laterale del veicolo. Una variazione della velocità di avanzamento v modifica l'autorità geometrica e giroscopica del controsterzo, alterando il guadagno d'anello effettivo del rollio; analogamente, un incremento di $K_{p,yaw}$ o uno scostamento centesimale di ϕ_{offset} sollecitano maggiormente l'anello interno di rollio, riducendo i margini di smorzamento del modo oscillatorio di *weave*. Questo legame mutuo rende la taratura empirica multiparametrica particolarmente complessa, poiché l'ottimizzazione di un singolo indice di prestazione può degradare rapidamente l'equilibrio complessivo del sistema;

- **Estensione spaziale, durata delle finestre e numerosità del campione sperimentale**: sebbene i collaudi siano stati effettuati all'aperto, gli spazi operativi liberi da ostacoli risultavano comunque effettivamente limitati e ridotti, imponendo finestre di marcia stabilizzata di circa $6.4 \div 6.5\,\mathrm{s}$ prima dell'arresto di sicurezza. Inoltre, l'analisi comparativa presentata nel Capitolo 6 si basa su singole prove rappresentative per ciascuna configurazione: tale orizzonte non consente di osservare l'esaurimento completo dei transitori lenti di imbardata né di condurre una caratterizzazione statistica su prove ripetute a parità di condizioni;

- **Mancato utilizzo della misura dell'angolo di sterzo δ e limiti dell'anello di yaw rate**: l'encoder presente sul piantone di sterzo non è stato alimentato né impiegato, per cui la deriva dell'angolo meccanico del manubrio δ non è stata osservata né compensata; inoltre la legge puramente proporzionale a basso guadagno ($|K_{p,yaw}| = 0.015$, priva di azione integrale) non possiede un'autorità sufficiente a reiettare gli sbilanciamenti stazionari;

- **Acquisizione seriale MATLAB**: la registrazione seriale lato PC ha memorizzato il 28.3% dei pacchetti nel Test 2 (71.7% non registrati) e il 34.1% nel

Test 3 (65.9% non registrati) rispetto al flusso generato a 100 Hz dall'STM32, a causa delle pause di aggiornamento dell'interfaccia grafica MATLAB.

7.3 Sviluppi Futuri

Le attività svolte gettano le basi per una serie di sviluppi successivi, sia a livello di controllo embedded e sensoristica hardware sia di navigazione ad alto livello:

1. **Perfezionamento dell'anello locale di yaw rate e stima automatica dell'offset su STM32**: per annullare l'errore stazionario di velocità di imbardata direttamente a livello embedded (sfruttando la misura $\dot{\psi}_{meas}$ già disponibile sull'IMU BNO055), si prevede l'introduzione di un'azione integrale a banda limitata ($K_{i,yaw}$) dotata di anti-windup e di un osservatore a bassa frequenza per la calibrazione automatica in marcia dell'offset di equilibrio ϕ_{offset}.

2. **Attivazione dell'encoder di sterzo e controllo di posizione angolare** δ: l'alimentazione e l'acquisizione dell'encoder già presente sul cannotto della forcella consentiranno di misurare direttamente l'angolo di sterzo δ, eliminando la deriva di integrazione meccanica del motoriduttore pilotato in tensione e abilitando sia la chiusura di un anello locale di posizione dello sterzo sia l'implementazione di leggi di controllo multivariabili dello stato completo (come LQR).

3. **Ottimizzazione del logging telemetrico e profilazione hardware dei tempi di ciclo**: per eliminare la perdita di pacchetti lato PC, il quattordicesimo canale float del frame telemetrico (`spare`) potrà essere impiegato per trasmettere il contatore progressivo di ciclo a 100 Hz o il timestamp hardware dell'STM32, affiancando nella GUI MATLAB una lettura seriale asincrona basata su callback (`configureCallback`) disaccoppiata dal rendering grafico. Contestualmente, l'impiego del contatore cicli hardware DWT (`DWT->CYCCNT`) o la commutazione di un pin GPIO all'interno della routine `Control_Step()` permetterà la misura strumentale diretta del tempo di calcolo e del jitter del loop di controllo.

4. **Integrazione con lo stack ROS 2 e High-Level Controller per il controllo della traiettoria**: per governare la posa cartesiana (X, Y, ψ) nel piano – non osservabile dal solo microcontrollore – il passo successivo prevede l'interfacciamento permanente con la scheda NVIDIA Jetson. Come illustrato in Figura 7.1, lo stack di navigazione (Nav2) confronterà la mappa pianificata con la traiettoria ricostruita via odometria e fusione sensoriale, calcolando l'errore laterale (*cross-track error*) e aggiornando in tempo reale il riferimento $\dot{\psi}_{ref}(t)$ inviato all'STM32.

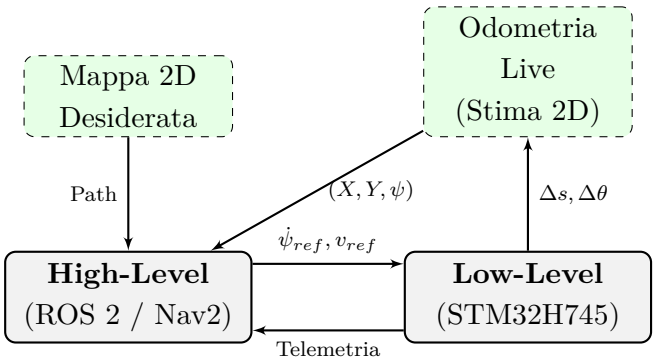


Figura 7.1: *Schema concettuale della chiusura dell'anello di navigazione spaziale demandato all'High-Level Controller.*

5. **Controllo a guadagni programmati (*gain scheduling*) e campagne multi-prova**: poiché la dinamica laterale del veicolo dipende sensibilmente dalla velocità di avanzamento v, un'evoluzione naturale consiste nel parametrizzare i guadagni dei regolatori in funzione della velocità misurata dall'encoder e nel condurre campagne sistematiche per ciascuna configurazione.

Bibliografia e Sitografia

[1] Emanuele Felicetti. Telemetria e identificazione data-driven per il controllo pid sperimentale di una bicicletta. Relazione di progetto di laboratorio di automazione, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, 2026. Progetto Superbike, A.A. 2025/2026.

[2] J. P. Meijaard, Jim M. Papadopoulos, Andy Ruina, and A. L. Schwab. Linearized dynamics equations for the balance and steer of a bicycle: a benchmark and review. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463(2084):1955–1982, 2007.

[3] Karl J. Åström, Richard E. Klein, and Anders Lennartsson. Bicycle dynamics and control: Adapted bicycles for education and research. *IEEE Control Systems Magazine*, 25(4):26–47, 2005.

[4] Andrea Perugini. Integrazione di hardware e firmware per il controllo di una e-bike a guida autonoma. Tesi di laurea in ingegneria informatica e dell'automazione, Universita Politecnica delle Marche, 2024. Relatore: Prof. Andrea Bonci.

[5] Bosch Future Mobility Challenge. BFMC 2026 – Technical Documentation. Competizione universitaria a guida autonoma, `https://boschfuturemobility.com`, 2026.

[6] STMicroelectronics. *STM32H745/755 and STM32H747/757 Datasheet*, 2023. Rev. 10, DS12556.

[7] Bosch Sensortec. *BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor*, 2022. Datasheet Rev. 1.7.

[8] Maxon Motor ag. *MAXON DCX 35 L - HEDL 5540 Datasheet*, 2025.

[9] Robin S. Sharp. On the stability and control of the bicycle. *Applied Mechanics Reviews*, 61(6):060803, 2008.

[10] J. D. G. Kooijman, J. P. Meijaard, Jim M. Papadopoulos, Andy Ruina, and A. L. Schwab. A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects. *Science*, 332(6027):339–342, 2011.

[11] Yoshiyuki Tanaka and Toshiyuki Murakami. A study on straight-line tracking and posture control in electric bicycle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(1):159–168, 2009.

[12] Neil H. Getz and Jerrold E. Marsden. Control for an autonomous bicycle. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1397–1402. IEEE, 1995.

[13] Karl J. Åström and Tore Hägglund. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America, 2 edition, 1995.

[14] Open Robotics. ROS 2 Documentation, 2026. Sitografia.

[15] Steve Macenski e collaboratori. Nav2: Navigation2 per ROS 2, 2026. Sitografia.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il mio relatore, il Prof. Andrea Bonci, per avermi dato l'opportunità di lavorare a questo progetto e per la disponibilità e le preziose indicazioni fornite durante la stesura della tesi.

Un ringraziamento sincero va al correlatore, il Dott. Alessandro Di Biase, per il costante supporto tecnico, la pazienza e l'aiuto concreto durante tutte le attività di laboratorio e le sessioni di collaudo sperimentale.

Grazie di cuore alla mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto con fiducia e incoraggiamento lungo tutto questo percorso di studi, permettendomi di raggiungere questo traguardo.

Un ultimo ringraziamento va ai miei amici e ai compagni di università, con cui ho condiviso fatiche, soddisfazioni e momenti importanti di questi anni.

Ancona, 2026

Emanuele Felicetti