



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E INGEGNERIA INFORMATICA

---

MECCANICA DELLE VIBRAZIONI

# Misure di un robot mobile in frenata

**Professore:**

**Prof. Cavacece**

**Partecipanti:**

**Gabriele Iacovacci**

**Lorenzo Grande**

**Gabriele Ortolani**

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione con descrizione del progetto</b>	<b>3</b>
1.1	Presentazione partecipanti . . . . .	3
1.2	Scelta progetto e obiettivo . . . . .	4
1.2.1	Obiettivo sperimentale . . . . .	4
1.3	Sviluppo e controllo . . . . .	4
1.3.1	Arduino e sensor fusion . . . . .	5
1.3.2	Controllo motori in feedback . . . . .	5
1.3.3	Filtraggio della distanza . . . . .	6
1.4	MPU6050 e trasmissione per l'analisi dei dati . . . . .	7
1.4.1	MPU6050 sensor . . . . .	7
1.4.2	Protocollo di comunicazione . . . . .	8
1.5	Set-up sperimentale . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Modello matematico</b>	<b>9</b>
2.1	Cinematica unicycle . . . . .	9
2.2	Controllo Cinematico dell'unicycle . . . . .	11
2.2.1	Introduzione . . . . .	11
2.2.2	Stabilità . . . . .	12
2.3	Dinamica Unicycle . . . . .	12
2.3.1	Introduzione . . . . .	12
2.3.2	Dinamica Unicycle . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Analisi dei risultati</b>	<b>15</b>
3.1	Analisi nel dominio del tempo . . . . .	15

3.1.1	Introduzione . . . . .	15
3.1.2	Risultati analisi nel tempo . . . . .	16
3.2	Confronto dei risultati . . . . .	17
3.3	Analisi nel dominio delle frequenze . . . . .	19
3.3.1	Introduzione . . . . .	19
3.3.2	Risultati analisi in frequenza . . . . .	20
3.4	Analisi della stabilità . . . . .	21
3.4.1	Stabilità accelerometro . . . . .	22
3.4.2	Stabilità giroscopio . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Discussione del progetto e conclusioni</b>	<b>27</b>

# Capitolo 1

## Introduzione con descrizione del progetto

### 1.1 Presentazione partecipanti

La meccanica delle vibrazioni è un campo di studio fondamentale per comprendere il comportamento dinamico di sistemi fisici in movimento. Come studenti di ingegneria, abbiamo sempre approfondito la teoria attraverso la risoluzione di problemi analitici e la modellizzazione matematica. Tuttavia, siamo convinti che per comprendere a fondo tutti i concetti appresi in corsi come Fisica, Elettrotecnica, Controlli e Laboratorio di Automatica, sia necessario confrontare i risultati teorici con la realtà sperimentale. Per questo motivo, abbiamo scelto di sviluppare un progetto scientifico per il corso di meccanica delle vibrazioni, con l'obiettivo di analizzare e comparare i modelli teorici e sperimentali di un sistema vibrante. Come ha sottolineato il famoso scienziato Richard Feynman, 'la scienza non è fatta solo di parole e di concetti, ma di cose reali e di esperimenti'. Anche il fisico teorico Freeman Dyson ha evidenziato l'importanza dell'esperimento nella scienza, affermando che 'la scienza è la scoperta di ciò che funziona e la tecnologia è l'uso di ciò che funziona'. Con questo progetto, vogliamo dimostrare come la combinazione di teoria e esperimento sia fondamentale per la comprensione dei fenomeni dinamici e per lo sviluppo di tecnologie avanzate. Siamo Gabriele Ortolani, Lorenzo Grande e Gabriele Iacovacci, tre studenti di ingegneria dell'automazione, entusiasti di questo progetto e pronti a condividere i nostri risultati con voi.

## 1.2 Scelta progetto e obiettivo

Il progetto che abbiamo sviluppato per il corso di meccanica delle vibrazioni consiste nella realizzazione di un robot mobile con Arduino. Abbiamo costruito il robot interamente a mano utilizzando un telaio in legno; è formato da due ruote anteriori motrici e una ruota posteriore passiva necessaria alla sola stabilizzazione; per questo motivo può essere considerato un unicycle. Abbiamo utilizzato Arduino per implementare un algoritmo di controllo per la stabilizzazione del robot; utilizzando il nostro unicycle come mezzo sperimentale, abbiamo effettuato misurazioni delle vibrazioni analizzando i dati ottenuti per determinare la risposta dinamica del sistema.

Siamo ansiosi di condividere i risultati delle nostre sperimentazioni e di discutere i nostri metodi e le nostre scoperte con voi.

### 1.2.1 Obiettivo sperimentale

L'obiettivo principale in questo progetto è quello di simulare un'automobile in frenata e misurare gli effetti vibranti della dinamica utilizzando due metodi di frenata differenti. Il primo metodo simula l'utilizzo di un sistema ABS (Anti-lock Braking System) mentre il secondo simula l'utilizzo di un sistema di frenata tradizionale senza ABS.

L'ABS è un sistema di frenata che utilizza sensori e una centralina elettronica per impedire il bloccaggio delle ruote. Ciò consente una maggiore stabilità e controllo dell'auto durante la frenata, migliorando la sicurezza. Il metodo di frenata tradizionale senza ABS non ha questa funzionalità di controllo della stabilità e può causare il bloccaggio delle ruote.

Il confronto dei risultati dei due metodi di frenata ci permetterà di comprendere meglio l'importanza dell'ABS nella sicurezza della guida e la sua influenza sulla dinamica del veicolo.

## 1.3 Sviluppo e controllo

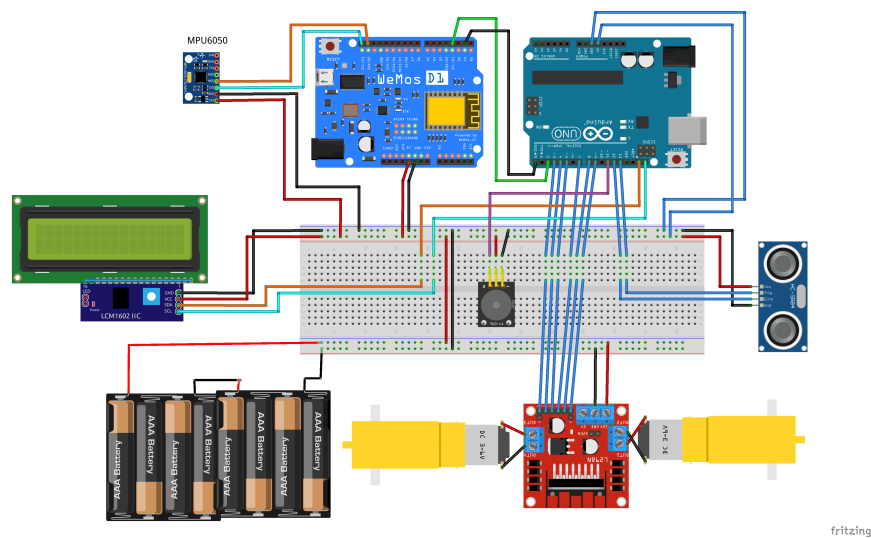
Il processo di costruzione del robot mobile è stato molto metodico. Siamo partiti dal disegno del telaio su un foglio, per poi trasferire la sagoma su un pannello di legno da 4mm. Utilizzando un seghetto alternativo abbiamo ritagliato la sagoma del telaio e abbiamo fissato gli pneumatici per completare la struttura del robot. Successivamente abbiamo installato il sistema di controllo Arduino collegando i vari componenti elettronici (sensori e motori).

### 1.3.1 Arduino e sensor fusion

Arduino è una piattaforma di sviluppo open-source basata su un microcontrollore AVR. Viene utilizzata per creare progetti interattivi con una vasta gamma di componenti elettronici come sensori, attuatori, motori e display. Arduino è facile da usare, anche per chi non ha esperienza di programmazione, in quanto utilizza un ambiente di sviluppo integrato (IDE) semplice e intuitivo basato su un linguaggio di programmazione simile al C++.

Arduino dispone di un gran numero di librerie preinstallate che permettono di interfacciare facilmente con i vari componenti elettronici. Inoltre, Arduino tramite i pin SDA e SCL, che hanno una funzione bus dati, permette la comunicazione I2C.

Figura 1.1: Schema dei collegamenti



### 1.3.2 Controllo motori in feedback

Per implementare il controllo dei motori DC con Arduino, viene utilizzato un driver L298N per interfacciare i motori con il microcontrollore. Tale driver consente di controllare la velocità e la direzione dei motori attraverso il PWM (modulazione di larghezza di impulso) e i pin di controllo di Arduino. Per simulare la frenata con ABS abbiamo utilizzato un sistema di controllo proporzionale basato su un sensore di distanza; tale sensore ci forniva la distanza dall'ostacolo, che veniva utilizzata come input per lo schema di controllo. Il controllo PID utilizzato ci ha consentito di modulare la velocità dei motori in base alla distanza dall'ostacolo, più questo si avvicinava, più la

velocità dei motori veniva ridotta, simulando una frenata graduale. In particolare, abbiamo utilizzato il segnale di distanza rilevato dal sensore per modulare il segnale PWM inviato ai motori, in questo modo il robot si è comportato come se stesse frenando gradualmente, come un sistema ABS frena un'automobile, evitando il bloccaggio delle ruote e mantenendo la stabilità durante la frenata. Per simulare la frenata senza ABS abbiamo semplicemente disattivato l'algoritmo di controllo e lasciato che i motori si fermassero ad una determinata distanza di sicurezza. In questo modo il robot avrebbe simulato una frenata più brusca mostrando come la stabilità della frenata è compromessa dal bloccaggio delle ruote.

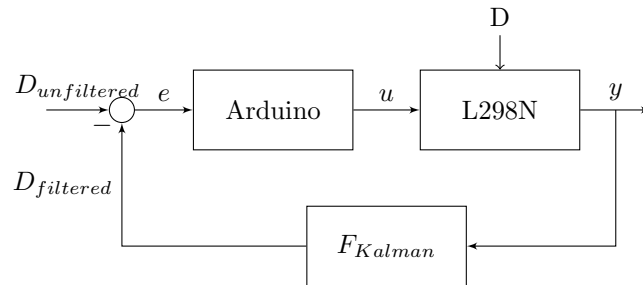
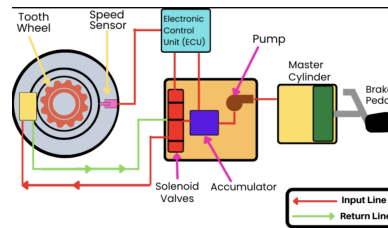


Figura sopra: Schema di controllo adottato

Figura 1.2: Esempio di un controllo ABS di un'automobile reale



### 1.3.3 Filtraggio della distanza

Durante lo sviluppo, testando più volte il nostro modello e rappresentando graficamente i dati, ci siamo accorti che il sensore HCSR04 era poco preciso nella misura della distanza, ovvero ci si aspettava comunque che misure vicine nel tempo fossero coerenti agli spostamenti. Così è stato implementato un controllo digitale, più precisamente un filtro di Kalman, per ridurre l'errore durante il funzionamento.

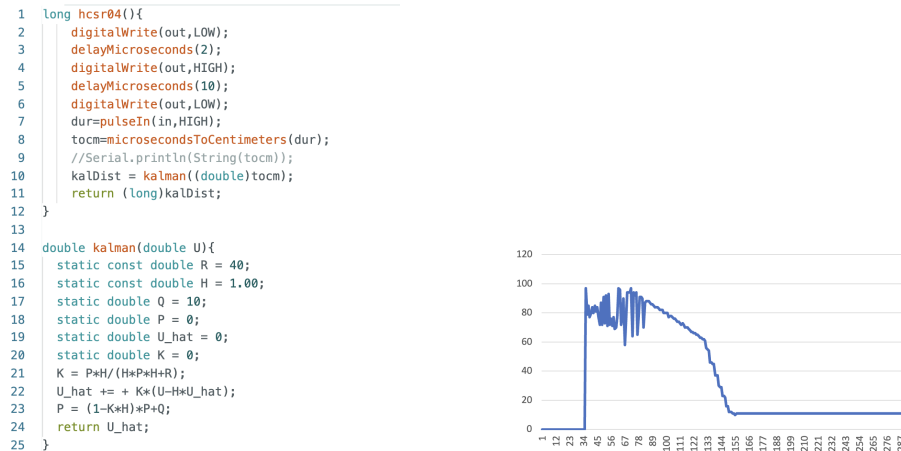


Figura 1.3: A sinistra il codice delle funzioni che misurano e filtrano la distanza, a destra un grafico della distanza senza filtro

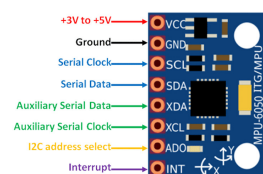
## 1.4 MPU6050 e trasmissione per l'analisi dei dati

Nel nostro progetto abbiamo utilizzato il sensore MPU6050 per misurare i movimenti del robot mobile durante le frenate con e senza ABS per rilevare i dati di accelerazione e velocità di rotazione forniti dal sensore per valutare la stabilità del robot e verificare l'efficacia del sistema di controllo implementato. Per trasmettere i dati rilevati dal sensore al nostro computer abbiamo utilizzato un WEMOS D1, una scheda di sviluppo basata su ESP8266, come intermediario tra il sensore e il PC. La libreria seriale di Arduino ha permesso l'invio dei dati del sensore al WEMOS D1, successivamente tramite il protocollo di rete UDP i dati vengono inviati ad un PC dove un'applicazione python li elabora e visualizza i risultati. Questa configurazione ci ha permesso di raccogliere i dati delle vibrazioni in modo efficiente per importarli facilmente su Matlab.

### 1.4.1 MPU6050 sensor

Il sensore MPU6050 è un dispositivo di misura di movimento a 6 assi che combina un accelerometro e un giroscopio in un unico pacchetto.

La tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) è utilizzata per misurare l'accelerazione lungo i 3 assi ( $x, y, z$ ) e la velocità di rotazione lungo i 3 assi (roll, pitch, yaw). Il sensore utilizza un'interfaccia I2C per la comunicazione con il microcontrollore ed è altamente preciso con un range di misura ampio. Inoltre, il sensore include un processore





di movimento integrato che consente di elaborare i dati dei sensori e fornire informazioni di orientamento e movimento in modo autonomo. Per utilizzare il sensore MPU6050 con Arduino esistono diverse librerie disponibili che forniscono molte API semplici e facili da utilizzare per accedere alle funzionalità del sensore. Ad esempio, la libreria "MPU6050" fornisce un insieme di funzioni per inizializzare e configurare il sensore, leggere i dati di accelerazione e velocità di rotazione e calcolare l'orientamento del dispositivo. Inoltre, alcune librerie come "I2Cdevlib-MPU6050" forniscono funzioni avanzate come il filtraggio dei dati, il controllo degli interrupt e la calibrazione del sensore, che possono essere utilizzate per migliorare la precisione e l'affidabilità dei dati.

### 1.4.2 Protocollo di comunicazione

Nel progetto, per rendere disponibili i dati del sensore MPU6050 dal robot mobile al computer senza l'utilizzo di schede di memoria, è stato implementato un protocollo di trasmissione dei dati che utilizza la comunicazione seriale e il protocollo di rete UDP. In primo luogo abbiamo configurato Arduino Uno come scheda "master" che si occupa del controllo dei motori e del campionamento dei dati, mentre il Wemos D1, con la sua funzione "slave", cattura i dati campionati, crea pacchetti UDP e li pubblica aspettando che un client li riceva. Questo protocollo ci ha permesso di eseguire test in modalità "real-time", poiché, quando il client si connette al server (Wemos D1), quest'ultimo manda un segnale, tramite un PIN digitale, al master che attiva il campionamento; così avviene la trasmissione wireless dei dati che andranno direttamente in analisi su Matlab.

## 1.5 Set-up sperimentale

Il capitolo sul set up sperimentale descrive l'impostazione utilizzata per condurre i test sul nostro modello.

Per i test abbiamo utilizzato le due modalità di frenata descritte in precedenza: una simulazione del sistema ABS e un'inchiodata. Posizionando la macchina a 1,5 m dal muro e definendo come target la frenata entro 8 cm dall'ostacolo (nel nostro caso un muro) abbiamo eseguito 5 test per tipologia di frenata. Per ciascuna simulazione, sono stati raccolti 150 campioni, ad una frequenza di 20Hz; per una durata di circa 8 secondi a test. Nel prossimo capitolo analizzeremo i dati raccolti per studiare il comportamento del nostro modello durante la frenata.

## Capitolo 2

# Modello matematico

Il primo passo che abbiamo dovuto affrontare per realizzare il codice che permettesse all'uniciclo di muoversi è stato quello di capire il modello matematico in questione. Per tale motivo, in questo capitolo andiamo a descrivere gli aspetti più importanti, dal punto di vista matematico, che hanno permesso la realizzazione del progetto.

### 2.1 Cinematica uniciclo

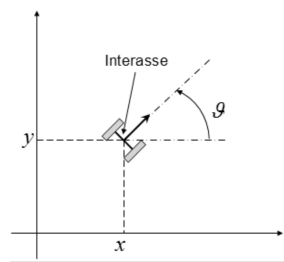


Figura 2.1: Veicolo uniciclo. Coordinate  $q = [x, y, \vartheta]^T$

Il modello da noi preso in esame è il modello di tipo *uniciclo*, essenziale nella robotica in quanto rappresenta una vasta serie di veicoli di uso comune, utilizzati principalmente nell'industria come agenti per il trasporto e la movimentazione di merci. La cinematica dell'uniciclo studia il movimento del veicolo in relazione alla posizione, orientazione e velocità. In particolare, le sue

equazioni sono date da:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_1 \cos \theta \\ \dot{y} = v_1 \sin \theta \\ \dot{\theta} = v_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

Le coordinate scelte per localizzare univocamente l'uniciclo sul piano sono  $\mathbf{q} = [x, y, \vartheta]^T$  mentre con  $v_1$  e  $v_2$  indichiamo rispettivamente la velocità longitudinale e la velocità rotazionale che sono date dalla seguente equazione:

$$\nu_1 = \frac{r}{2}(\omega_r + \omega_l) \quad (2.2)$$

$$\nu_2 = \frac{r}{Lr}(\omega_r - \omega_l) \quad (2.3)$$

dove  $r$  è il raggio delle ruote attuate ed  $Lr$  è la lunghezza dell'interasse delle ruote. A causa della sua semplicità costruttiva, però, l'uniciclo presenta un vincolo sulla velocità detto **vincoli non olonomo**. Tale vincolo, impedisce al veicolo di muoversi in direzione parallela all'interasse delle ruote, ma non limita lo spazio delle posizioni raggiungibili. In termini matematici, l'impossibilità di moto nella direzione parallela si traduce in un vincolo sulle velocità  $\dot{\mathbf{q}}$  che può essere espresso come:

$$\dot{x} \sin \vartheta - \dot{y} \cos \vartheta = 0 \quad (2.4)$$

Tale equazione può essere anche espressa in maniera matriciale come:

$$\begin{bmatrix} \sin \vartheta & -\cos \vartheta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = 0$$

Le soluzioni di tale equazione sono date da una base del nucleo di  $\mathbf{A}(\mathbf{q})$ , ad esempio:

$$\begin{bmatrix} \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Avendo uno spazio di dimensione tre ( $\mathbf{q} = [x, y, \vartheta]^T$ ) e solamente due soluzioni, abbiamo che lo spazio delle velocità ammissibili è limitato.

## 2.2 Controllo Cinematico dell'uniciclo

### 2.2.1 Introduzione

Una volta ottenuto il modello cinematico di un sistema meccanico vincolato è possibile adottare tecniche di controllo in grado di far eseguire al sistema predeterminati tipi di task. Data la natura del modello cinematico, i controlli calcolati saranno controlli in velocità. Il controllo dei veicoli sul modello cinematico si basa essenzialmente sulla teoria di Lyapunov e sui suoi corollari. Enunciamo di seguito alcuni dei criteri più importanti senza entrare troppo nel dettaglio.

**Definizione 2.1.** Una funzione  $\mathbf{V}(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  si dice definita positiva se valgono contemporaneamente le seguenti proprietà:

- $\mathbf{V}(0) = 0$
- $\forall x \in \mathbf{I}_r \setminus 0$  con  $\mathbf{I}_r$  intorno dell'origine,  $\mathbf{V}(\mathbf{x}) > 0$

**Definizione 2.2.** Sia  $(\mathbf{x}, u) = (0, 0)$  un equilibrio per il sistema  $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, u)$ , con  $x \in \mathbb{R}^n$  e  $u \in \mathbb{R}^m$ . Si consideri una funzione  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$  definita positiva e si consideri la sua derivata direzionale lungo il campo vettoriale  $f(\mathbf{x}, u)$ , ossia  $\frac{\partial \mathbf{V}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} f(\mathbf{x}, u)$ . Se la derivata è anch'essa definita positiva, l'equilibrio è un punto stabile. La stabilità nel controllo è un concetto molto importante per vari motivi:

- **Prevedibilità del sistema:** Un sistema stabile è prevedibile e risponde in modo coerente agli input del controllore. Ciò significa che è possibile prevedere il comportamento futuro del sistema.
- **Sicurezza:** Un sistema stabile è più sicuro rispetto ad un sistema instabile le cui risposte sono imprevedibili e incontrollabili.
- **Affidabilità:** Un sistema stabile è più affidabile rispetto a un sistema instabile, quest'ultimo, infatti, potrebbe causare problemi operativi e interruzioni
- **Efficienza:** Un sistema stabile è più efficiente rispetto a un sistema instabile, quest'ultimo potrebbe infatti richiedere maggiore controllo e aumentare costi o diminuire l'efficienza energetica

### 2.2.2 Stabilità

Come abbiamo visto assicurare la stabilità del nostro sistema è fondamentale, concentriamoci quindi su come è possibile valutare la stabilità di un sistema. Immaginiamo di aver un sistema del tipo:

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$$

Esistono varie condizioni necessarie, ma non sufficienti, per valutarne la stabilità:

- Nessun coefficiente deve essere nullo
- I coefficienti devono essere tutti positivi o tutti negativi

Le condizioni sopra enunciate sono anche sufficienti per polinomi di primo e secondo grado. Per i polinomi di grado maggiore bisognerà usare altri criteri. Vediamo, quindi, alcuni di questi metodi.

- Valutare le radici del polinomio caratteristico:  
 Se  $\lambda_i < 0 \forall i \rightarrow$  Il sistema è asintoticamente stabile  
 Se  $\exists \lambda_i > 0 \rightarrow$  Il sistema è instabile  
 Se  $\exists \lambda_i = 0 \rightarrow$  Il sistema è stabile
- Metodo Routh-Hurwitz: Una volta costruita la tabella di Routh-Hurwitz controllare la prima colonna e verificare se è tutta positiva
- Nyquist: Sia P il numero di poli della funzione di trasferimento con parte reale maggiore di zero ed N il numero di giri compiuti dal diagramma di Nyquist attorno al punto -1, conteggiati positivamente se compiuti in senso antiorario e negativamente se in senso orario. Il sistema è stabile se  $N = P$ . Se il diagramma passa per il punto -1, il valore di N non è ben definito.
- Luogo delle radici: Grafica l'andamento delle radici della funzione, se mi trovo nel semipiano sinistro il sistema è asintoticamente stabile.

## 2.3 Dinamica Uniciclo

### 2.3.1 Introduzione

La dinamica di un corpo rigido può essere descritta utilizzando la formulazione di Lagrange:

$$L = T - U$$

dove  $T$  rappresenta la somma delle energie cinetiche e  $U$  la somma delle energie potenziali del corpo rigido in esame. Indichiamo con  $q$  le coordinate che descrivono la posizione del corpo rigido e dei suoi componenti rispetto ad un qualsiasi sistema di riferimento, in generale si avrà  $T(q, \dot{q})$  ed  $U(q)$ . Definiamo ora l'equazione di Eulero-Lagrange come:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q}$$

Tenere presente che per ottenere esplicitamente le equazioni del moto del sistema occorre avere informazioni sulle forze che agiscono su di esso, come ad esempio la forza di attrito, la forza di gravità, la forza del motore e così via.

### 2.3.2 Dinamica Uniciclo

Il modello matematico di un uniciclo è generalmente descritto da due variabili dinamiche: la posizione  $x$  e la velocità angolare  $\vartheta$ . La posizione descrive la posizione longitudinale dell'uniciclo lungo un'asse orizzontale e la velocità angolare descrive la rotazione del veicolo intorno all'asse verticale. Supponiamo inoltre che sia presente una forza laterale  $u(t)$ . La dinamica dell'uniciclo può essere descritta dall'equazione di Eulero-Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i$$

dove  $Q_i$  rappresentano delle forze esterne che agiscono sul sistema descritto dalle variabili dinamiche  $q_i$ . Tali forze sono dovute, ad esempio, alla forza gravitazionale o di attrito. Con  $L$ , invece, rappresenta la funzione Lagrangiana del sistema, che per un uniciclo può essere descritta come:

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m R^2 \dot{\theta}^2 - V(x, \theta)$$

dove:

- $m$  indica la massa dell'uniciclo, che nel nostro caso vale:  $0.9 \text{ kg}$
- $R$  indica il raggio dello pneumatico, che nel nostro caso vale:  $0.07 \text{ m}$
- $V(x, \vartheta)$  è la funzione potenziale che descrive le forze che agiscono sul sistema. E in questo vale:  $V = mgx \cos \theta$

Definita la funzione Lagrangiana possiamo sostituirla nell'equazione di Eulero-Lagrange per ottenere una descrizione della dinamica dell'uniciclo:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = u \rightarrow m\ddot{x} - \frac{\partial V}{\partial x} = u \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \rightarrow mR^2\ddot{\theta} + mR \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (2.6)$$

In conclusione, la descrizione della dinamica dell'uniciclo tramite le equazioni di Eulero-Lagrange ci permette di analizzare la stabilità e la controllabilità di questo sistema. Questo ci consente di sviluppare strategie di controllo efficienti per garantire che l'uniciclo mantenga la sua stabilità durante le varie manovre.

## Capitolo 3

# Analisi dei risultati

### 3.1 Analisi nel dominio del tempo

Dopo aver fatto una breve digressione matematica su un modello generale di tipo unicycle, entriamo nello specifico del nostro progetto ed andiamo ad fare una analisi nel dominio del tempo, e in seguito in frequenza, delle nostre misurazioni. In particolar modo andremo a confrontare come il sistema evolve nel tempo in caso di frenata ABS e frenata tradizionale senza ABS

#### 3.1.1 Introduzione

L'analisi del tempo dei dati provenienti dall'accelerometro e dal giroscopio montati sull'unicycle è un aspetto importante per capire il comportamento dinamico del veicolo durante la frenata con ABS o senza. L'accelerometro misura l'accelerazione del veicolo, che può essere utilizzata per calcolare la velocità e posizione. Questi dati sono cruciali per capire se il veicolo sta frenando in modo corretto e sicuro. Infatti, se l'accelerazione è elevata ci aspettiamo una frenata brusca e con possibile instabilità del sistema. Il giroscopio, d'altra parte, misura la velocità angolare del veicolo. Le misurazioni del giroscopio sono quindi importanti per capire se l'unicycle sta mantenendo la sua stabilità durante la frenata. Ad esempio una variazione brusca dell'angolo di inclinazione indica una perdita di stabilità e la necessità di agire per riportare il veicolo in posizione stabile. In sintesi, l'analisi dei dati dell'accelerometro e del giroscopio è cruciale per garantire la sicurezza durante la frenata con ABS e con i freni stop. Questi dati possono essere utilizzati per verificare che la frenata sia effettuata in modo sicuro e che l'unicycle mantenga la sua stabilità durante l'intero processo. Inoltre, l'analisi dei dati può essere utilizzata per ottimizzare la performance del veicolo.



### 3.1.2 Risultati analisi nel tempo

Di seguito rappresenteremo grafici che mostrano come varia il PWM in funzione della distanza da uno ostacolo nei due casi in esame (frenata ABS e non): Notiamo subito dal grafico che nel caso

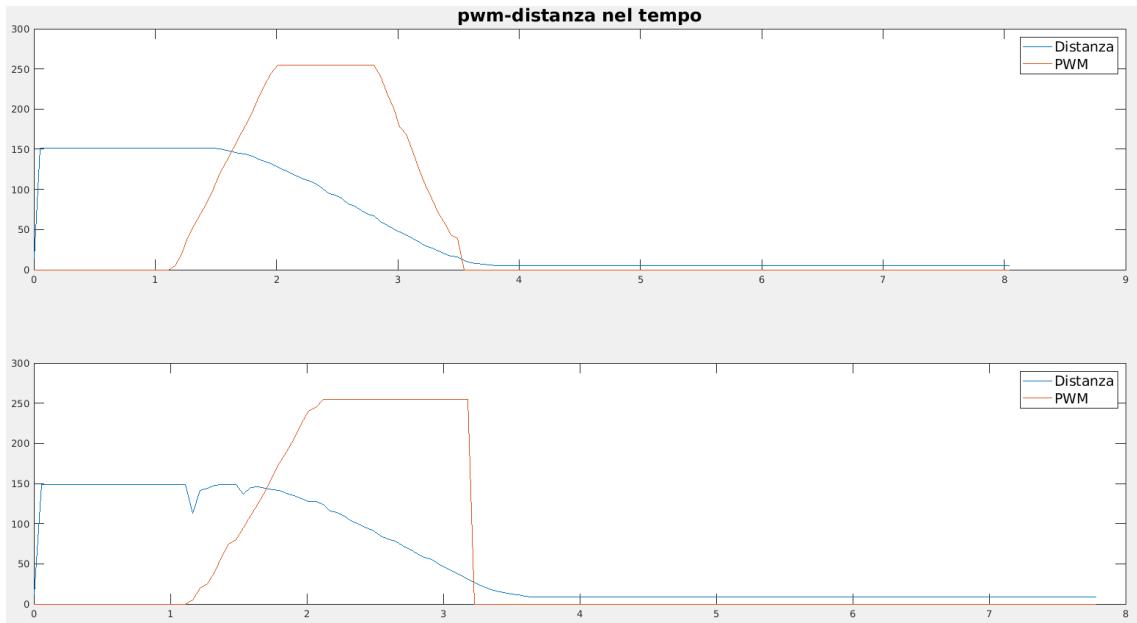
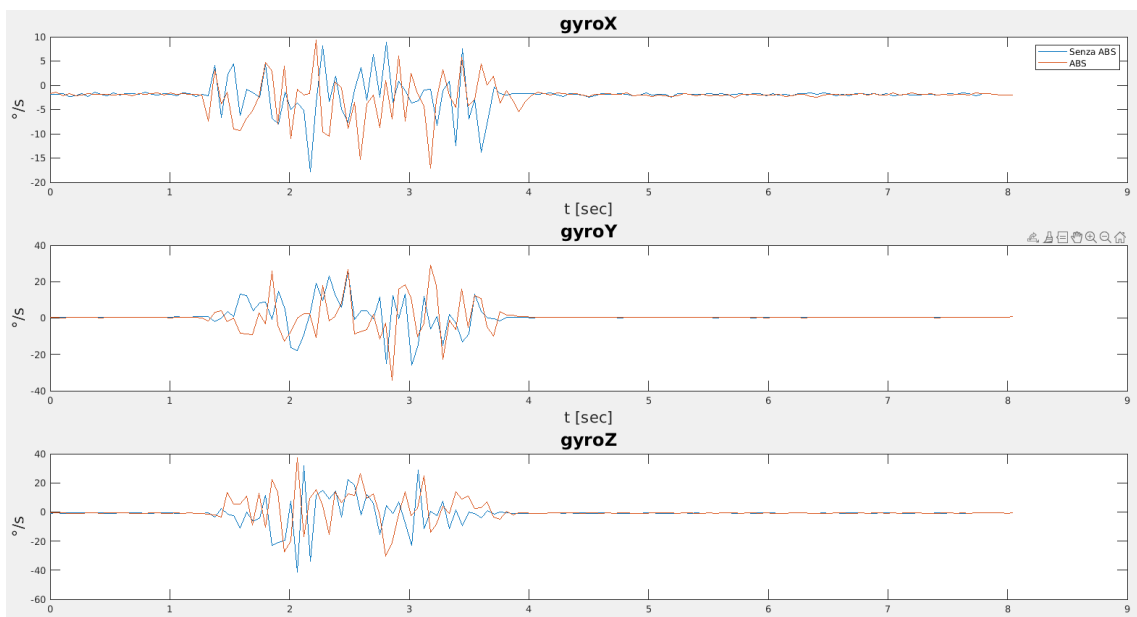


Figura 3.1: Rispettivamente caso ABS e non

di una frenata tradizionale, senza ABS, il PWM scende molto più velocemente in prossimità di un ostacolo, ci aspettiamo di vedere quindi maggiori variazioni nell'accelerometro e nel giroscopio:



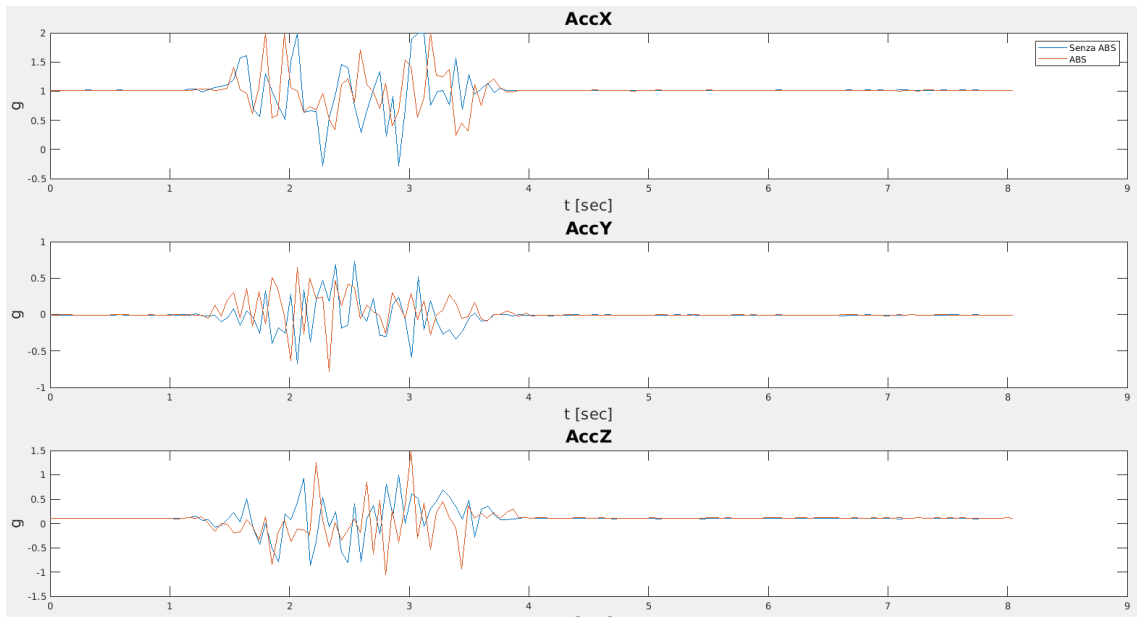
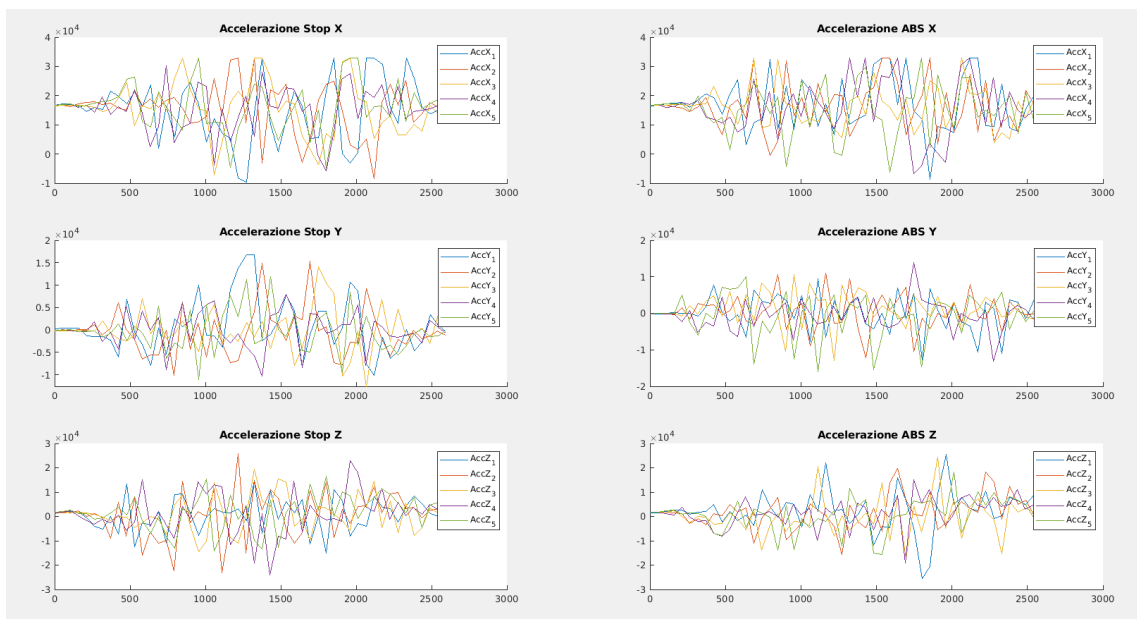


Figura 3.2: Rispettivamente grafico del giroscopio e dell'accelerometro dei due casi in esame

## 3.2 Confronto dei risultati

Per rendere le nostre analisi più affidabili, quello che abbiamo fatto è fare diverse misurazioni e poi confrontarle tra loro in uno script matlab denominato: "Media.m". In tale script consideriamo l'analisi del tempo, non più di una singola mole di dati, ma della media dei dati raccolti.



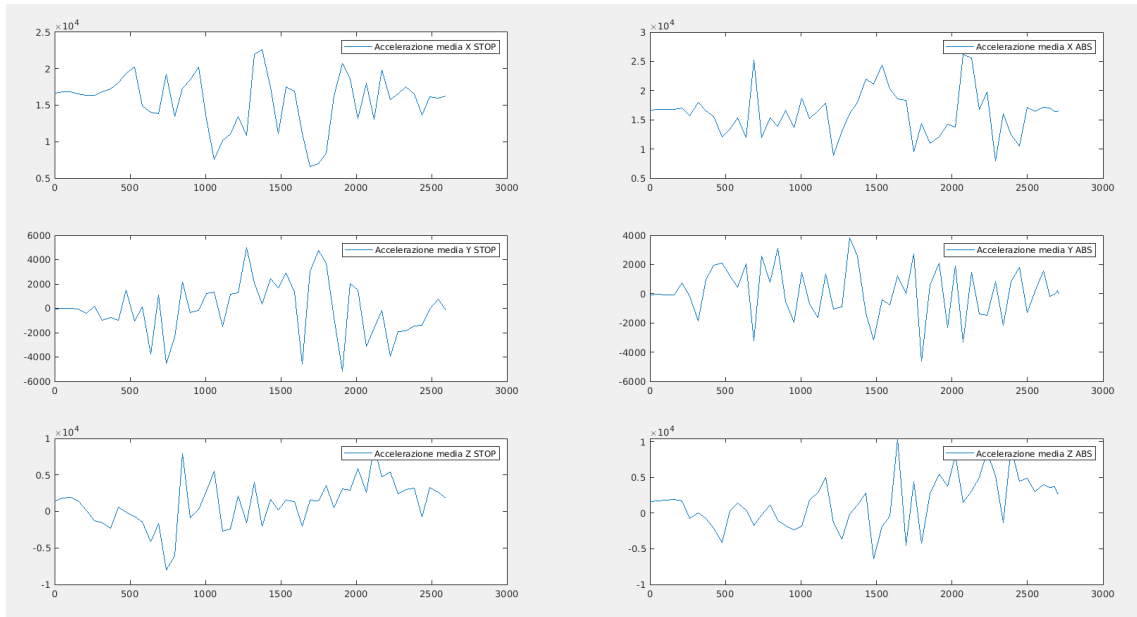
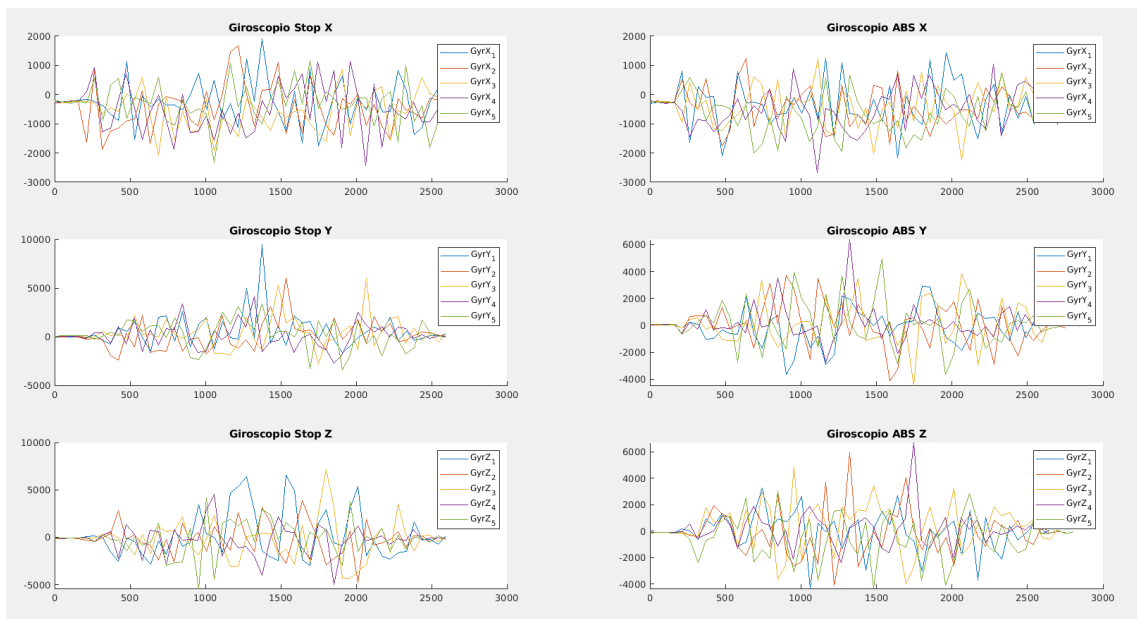


Figura 3.3: Confronto accelerazione e media risultante



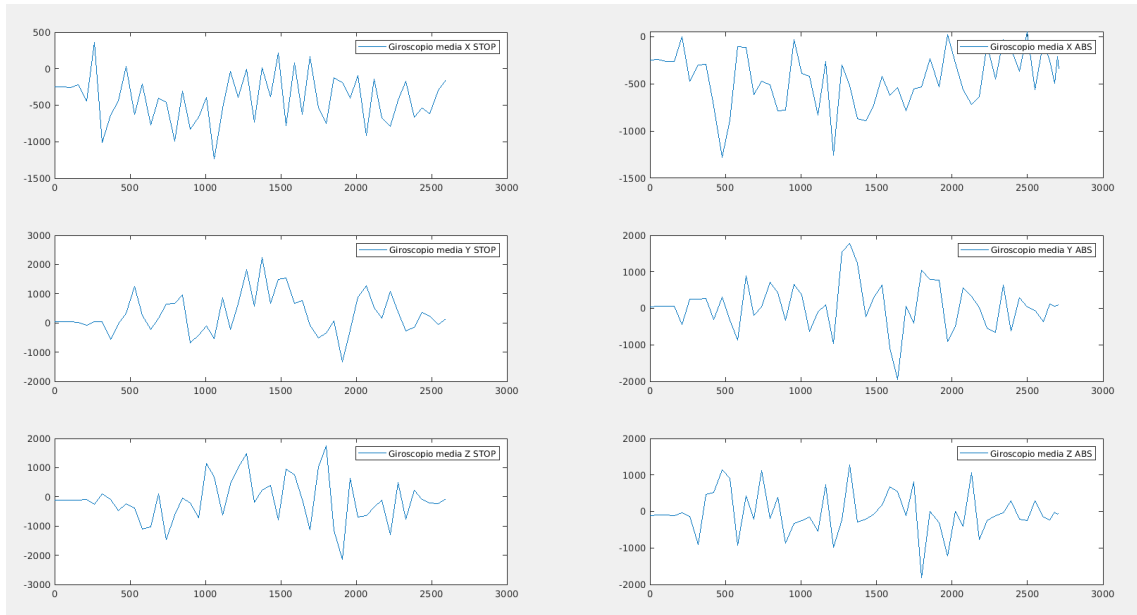


Figura 3.4: Confronto giroscopio e media risultante

### 3.3 Analisi nel dominio delle frequenze

#### 3.3.1 Introduzione

L'analisi in frequenza è un aspetto molto importante nella valutazione delle prestazioni del sistema. Questo tipo di analisi si basa sul concetto di trasformata di Fourier, che consente di trasformare un segnale temporale in una rappresentazione in frequenza. Utilizzando i dati raccolti da un accelerometro e da un giroscopio è possibile eseguire un'analisi in frequenza per identificare le frequenze naturali del sistema. Queste frequenze possono influire sulla stabilità del sistema durante la frenata, poiché una coincidenza tra una frequenza naturale del sistema e la frequenza di eccitazione durante la frenata può causare amplificazione delle vibrazioni e destabilizzazione del sistema. Tramite l'analisi in frequenza possiamo confrontare la risposta dinamica dei due sistemi in esame, ossia il sistema con frenata ABS e con frenata tradizionale. Inoltre tramite questa analisi possiamo identificare eventuali problemi di robustezza del sistema in frenata. Ad esempio, se la frenata ABS o la frenata tradizionale non rispondono in maniera adeguata a sollecitazioni impreviste avremo problemi di affidabilità del sistema.

### 3.3.2 Risultati analisi in frequenza

Di seguito rappresenteremo grafici che mostrano in frequenza l'andamento in frequenza dell'accelerometro e giroscopio nel caso ABS e non: Tolto qui

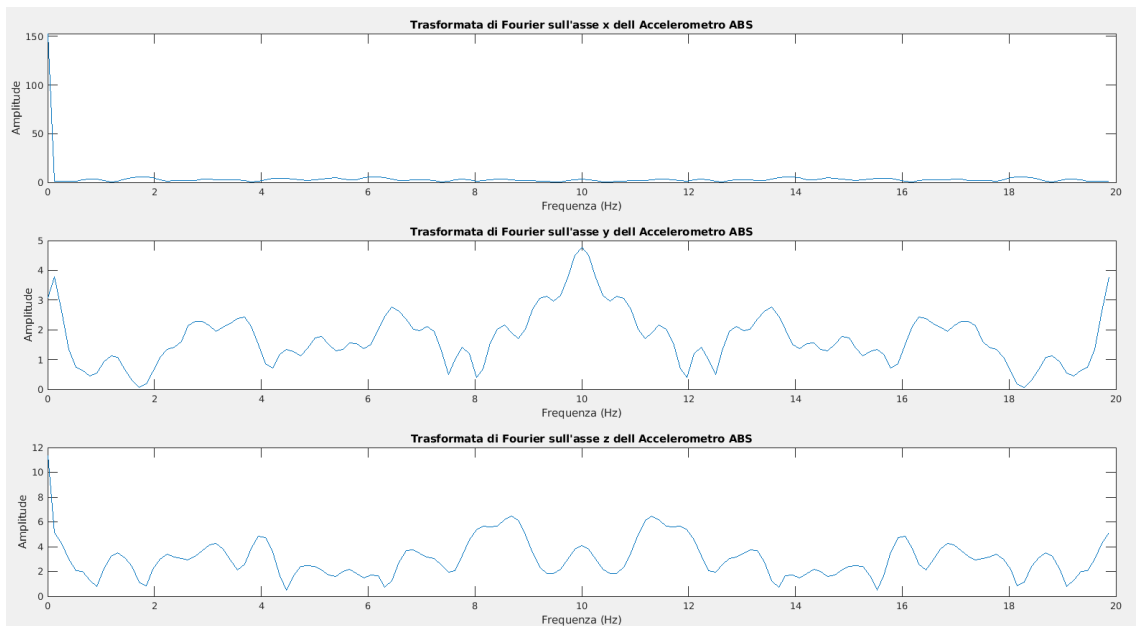


Figura 3.5: Grafico in frequenza dell'accelerometro caso ABS

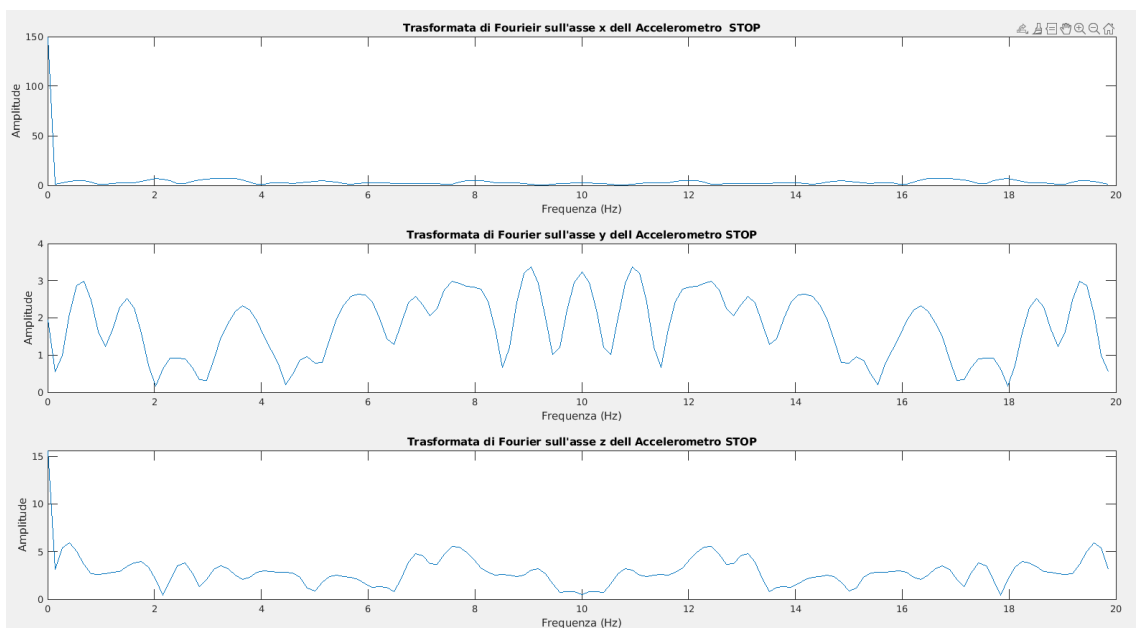


Figura 3.6: Grafico in frequenza dell'accelerometro caso NON ABS

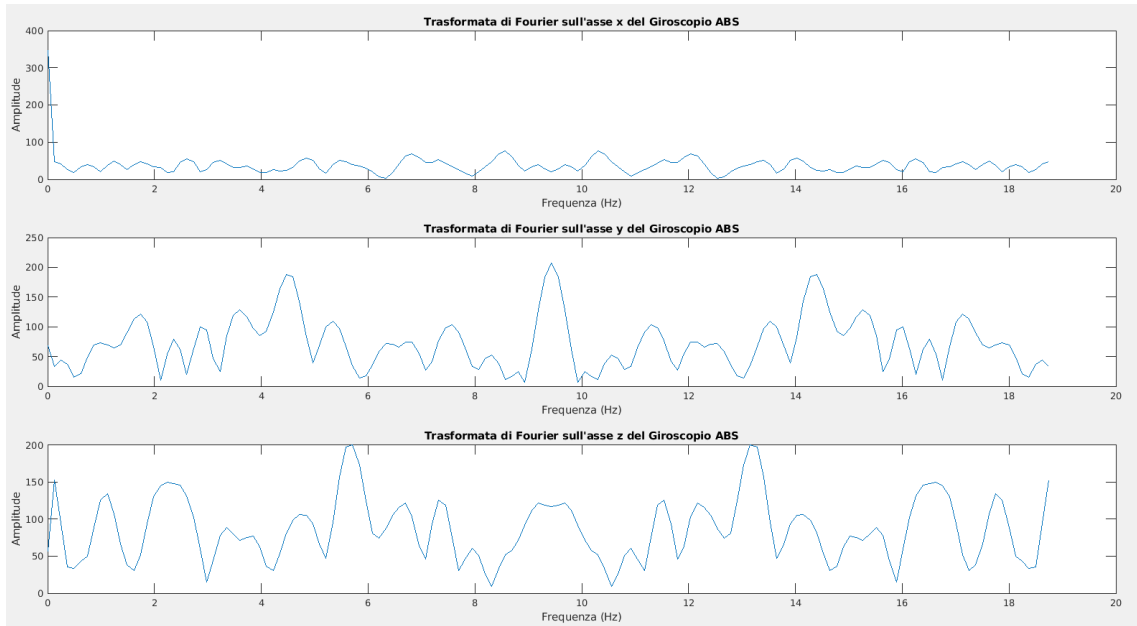


Figura 3.7: Grafico in frequenza del giroscopio caso ABS

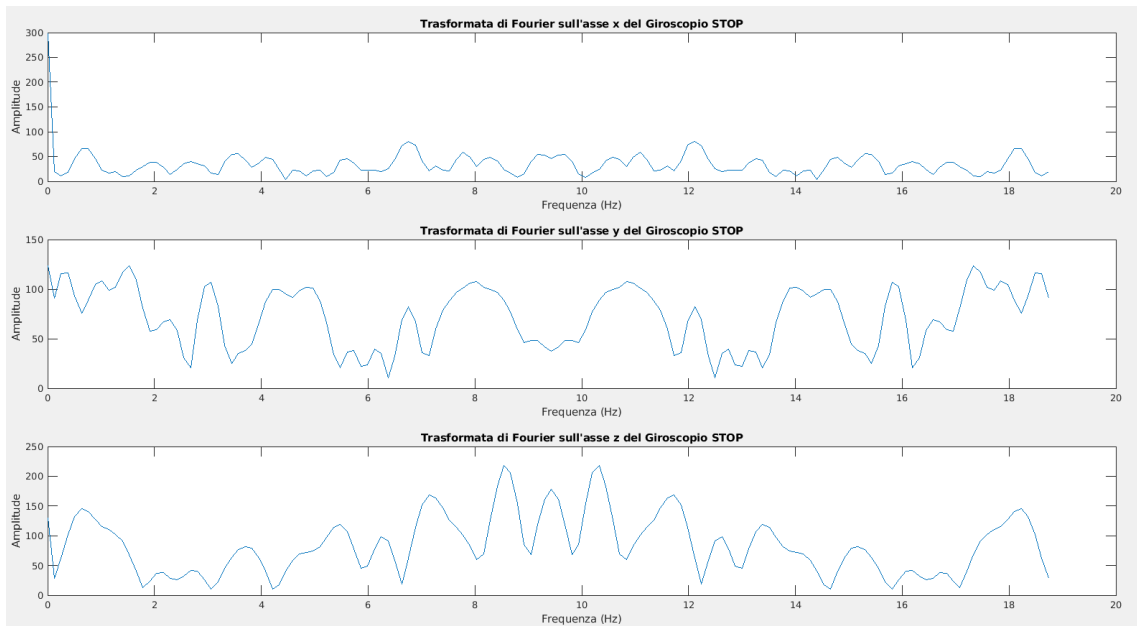


Figura 3.8: Grafico in frequenza del giroscopio caso NON ABS

### 3.4 Analisi della stabilità

Come abbiamo già descritto nel capitolo precedente, una caratteristica fondamentale dei noi sistemi è la stabilità, per tale motivo è fondamentale, analizzare la stabilità del nostro sistema. Per farlo

andremo ad usare i metodi descritti nel capitolo 2: Radici del polinomio caratteristico, Criterio di Nyquist e luogo delle radici.

### 3.4.1 Stabilità accelerometro

```
% Stabilita ACCELEROMETRO ABS

%Introduciamo prima la risposta in frequenza dei tre assi e in
    seguito calcoliamo la funzione di trasferimento:

clc

Ts = 1/Fs;
rX_ABS = frd(X_ABS,f_abs_a,Ts);
rY_ABS = frd(Y_ABS,f_abs_a,Ts);
rZ_ABS = frd(Z_ABS,f_abs_a,Ts);

np = 8;
nz = np-1;

%Funzione di trasferimento:
fdtX_ABS = tfest(rX_ABS, np, nz);
fdtY_ABS =tfest(rY_ABS, np, nz);
fdtZ_ABS =tfest(rZ_ABS, np, nz);

%Esaminiamo la stabiita del sistema tramite valutazione dei poli
    della funzione di trasferimento:
pole(fdtX_ABS)
pole(fdtY_ABS)
pole(fdtZ_ABS)

%-----Fine Codice-----
```

Il codice appena introdotto è solo una parte di quello scritto e mostra uno dei tre metodi che sono stati utilizzati per valutare la stabilità del sistema. Tale codice stampa a schermo i poli del sistema, i quali risultano tutti a parte reale negativa, mostrando quindi che il sistema è asintoticamente stabile. Il resto del codice, che non viene qui riportato ma che è possibile trovare tra gli script

matlab con il nome di "Stabilita.accelerometro.m", mostra invece i grafici relativi al diagramma di Nyquist e al luogo delle radici:

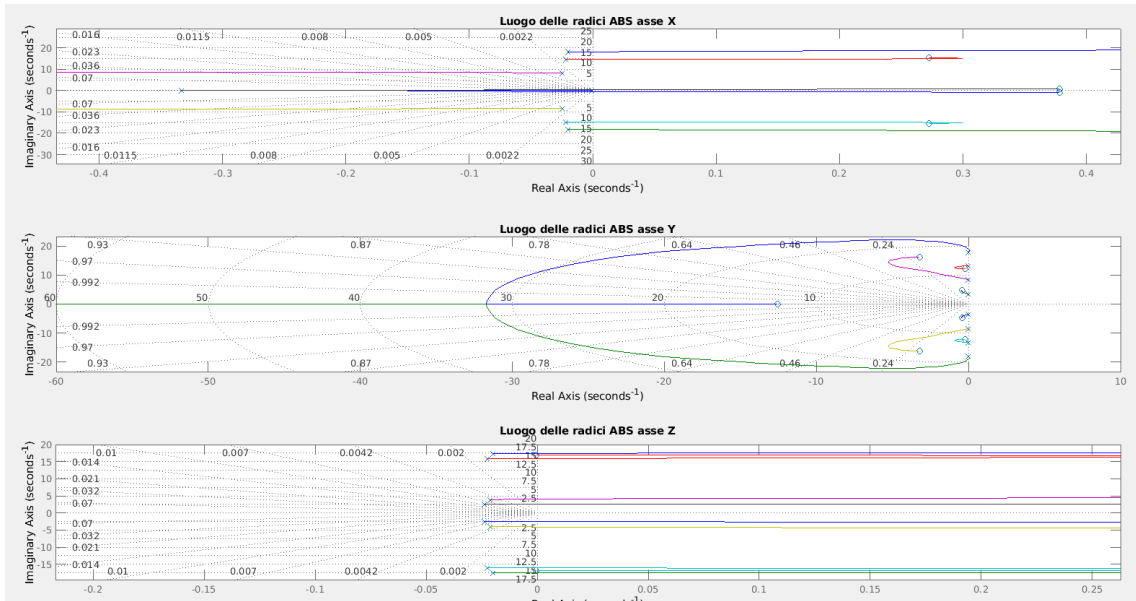


Figura 3.9: Luogo delle radici caso ABS

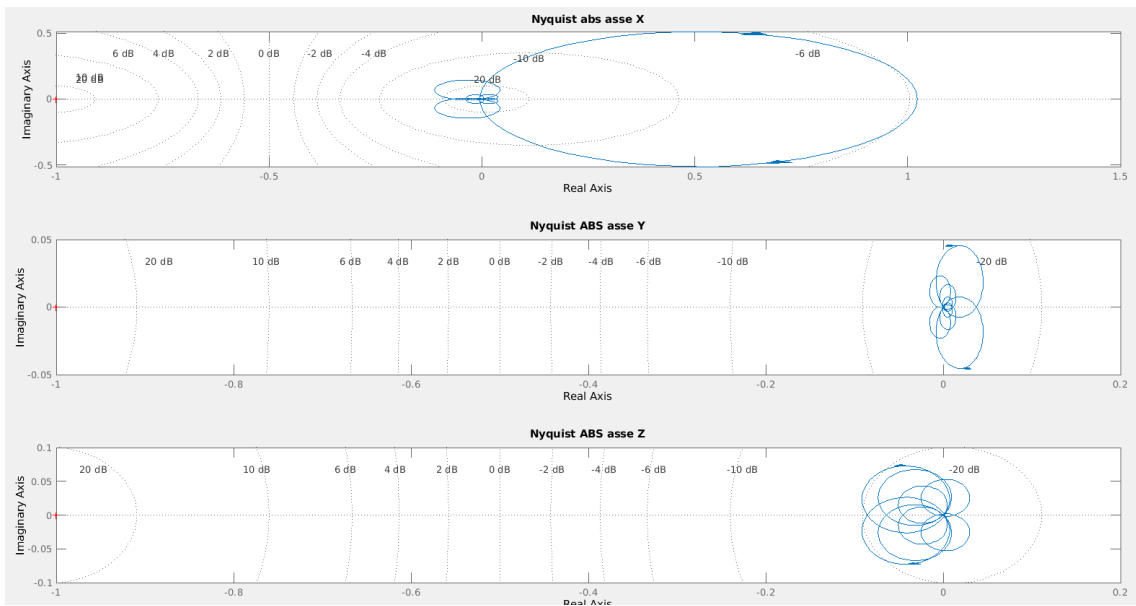


Figura 3.10: Diagramma di Nyquist caso ABS



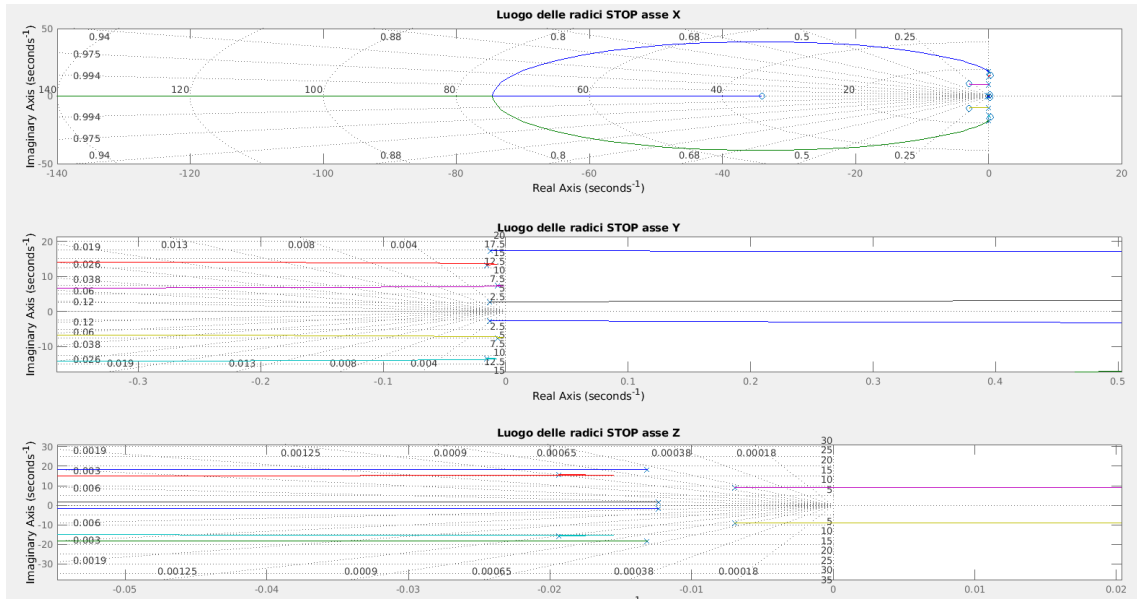


Figura 3.11: Luogo delle radici caso NON ABS

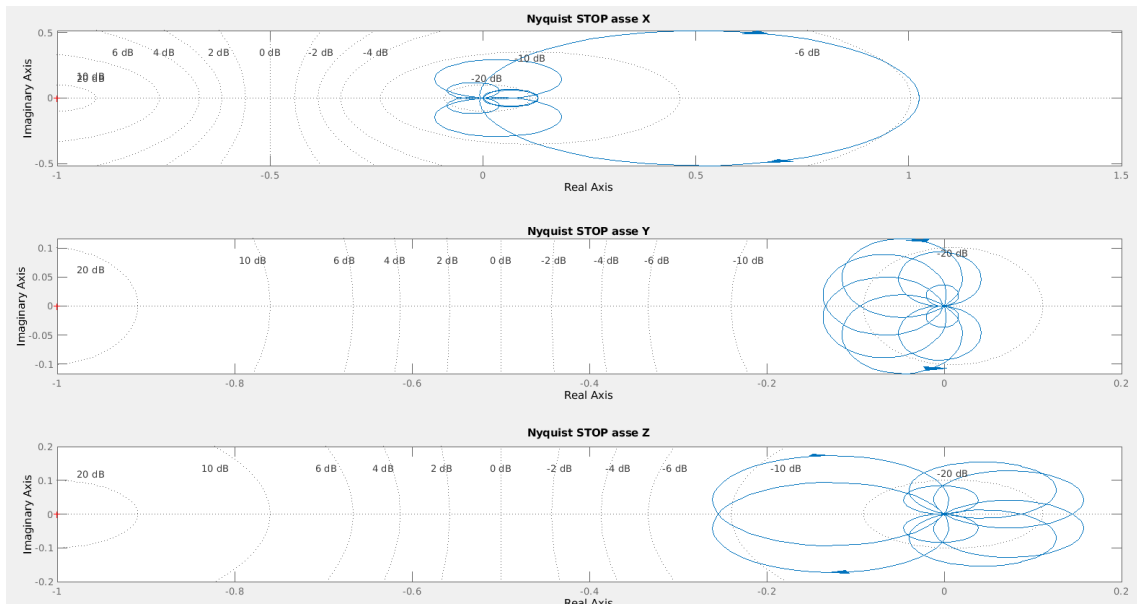


Figura 3.12: Diagramma di Nyquist caso NON ABS

### 3.4.2 Stabilità giroscopio

Nel caso del giroscopio il codice matlab è pressoché uguale, a variare sono solo i dati ricevuti. Il codice è comunque presente tra gli script matlab con il nome di :”Stabilita\_giroscopio.m”. Andiamo ad osservare ora i grafici relativi al luogo delle radici e al Diagramma di Nyquist:

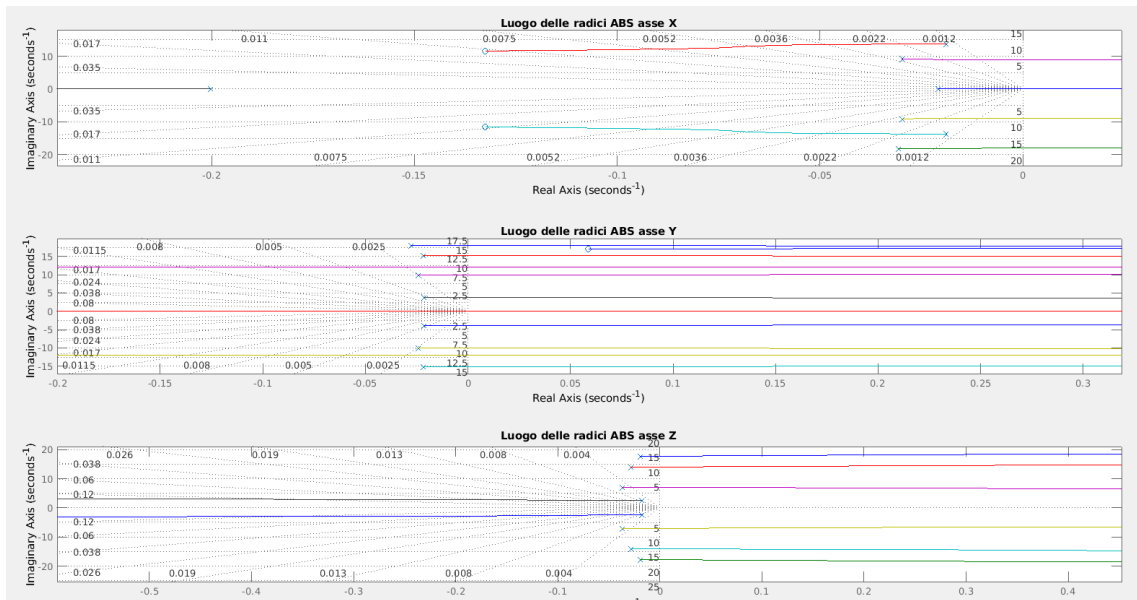


Figura 3.13: Luogo delle radici caso ABS

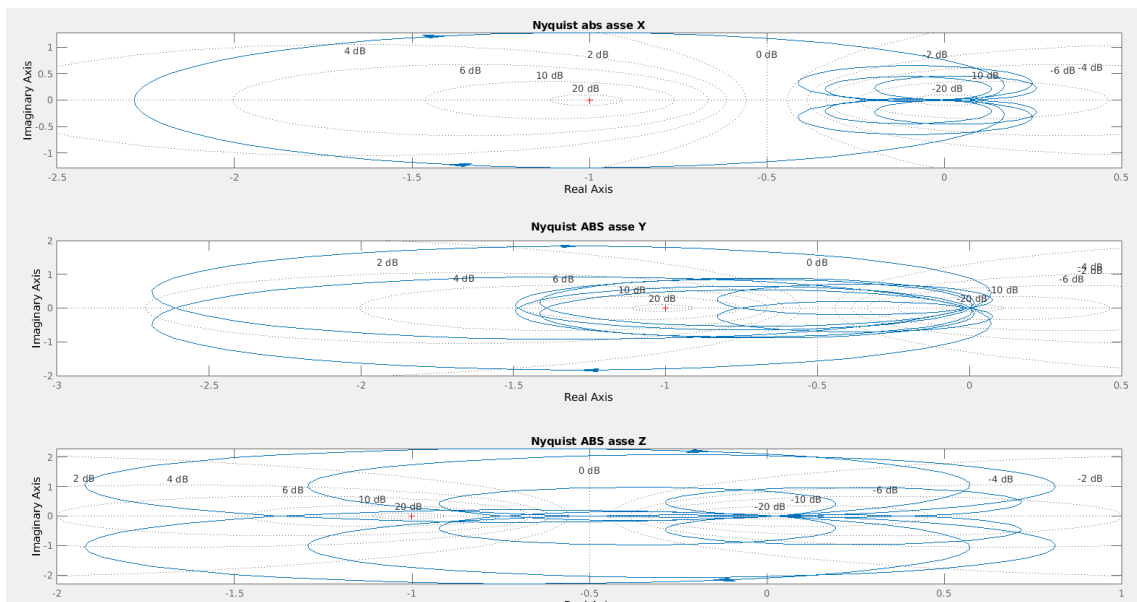


Figura 3.14: Diagramma di Nyquist caso ABS

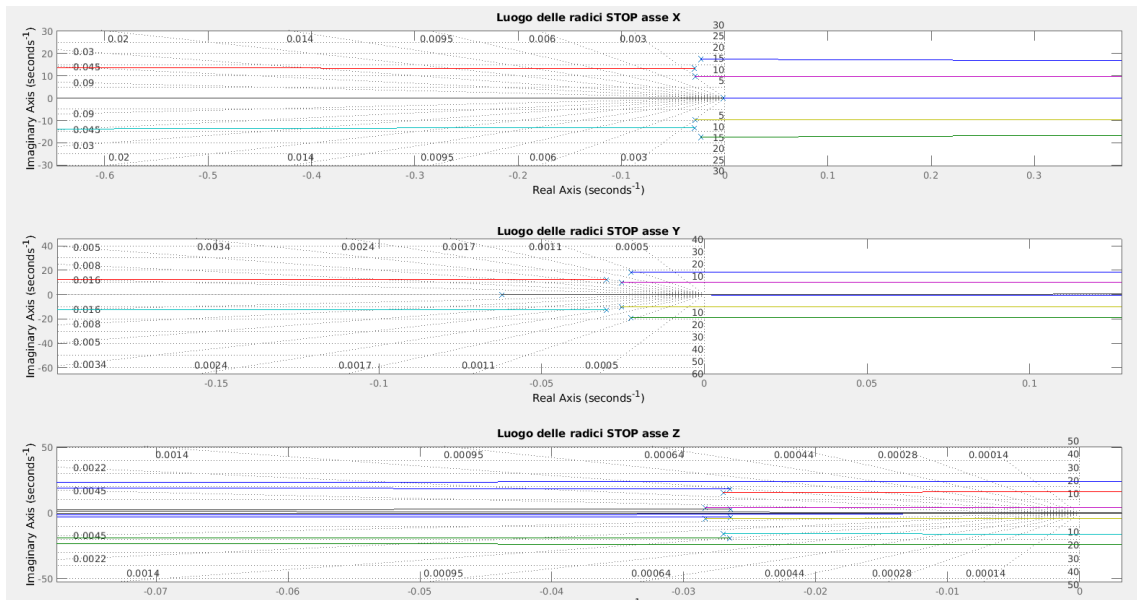


Figura 3.15: Luogo delle radici caso NON ABS

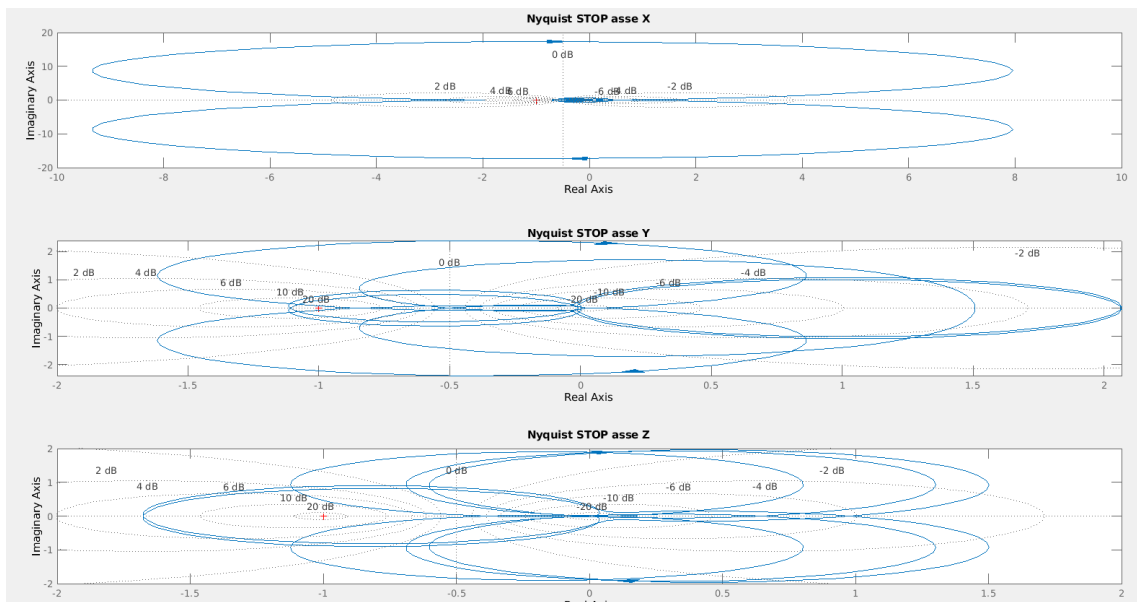


Figura 3.16: Diagramma di Nyquist caso NON ABS

## Capitolo 4

# Discussione del progetto e conclusioni

Concludendo il progetto, possiamo affermare con soddisfazione che è stata un'esperienza costruttiva e formativa per tutti noi. Grazie all'approfondimento nell'ambito dello studio delle vibrazioni e del controllo digitale, abbiamo acquisito una vasta gamma di conoscenze e competenze tecniche che ci saranno utili in futuro.

Inoltre abbiamo avuto modo di affrontare sfide stimolanti e impegnative, come la stesura della relazione in Latex e l'analisi in Matlab.

Questo progetto, ci ha inoltre aiutato a comprendere il perché la frenata di tipo ABS sia fondamentale per la sicurezza stradale. Infatti, grazie ad un'analisi dei risultati abbiamo osservato come le vibrazioni delle frenata ABS divergessero in modo minore dall'equilibrio rispetto a quelle in modalità STOP. In realtà, quello che ci saremo aspettati era l'instabilità asintotica del modello STOP, che invece dalle nostre analisi risulta anch'esso asintoticamente stabile. Questo risultato può essere giustificato dal fatto che il modello utilizzato per la nostra analisi era molto semplificato e potrebbe non essere rappresentativo di tutte le situazioni reali. Tuttavia, come già detto in precedenza, le vibrazioni osservate durante la frenata in modalità STOP indicano comunque un comportamento tendente all'instabilità, e questo potrebbe avere implicazioni importanti per la sicurezza dei veicoli. In definitiva, siamo grati per questa occasione che ci ha permesso di mettere in pratica le conoscenze acquisite durante il corso degli studi e di migliorare le nostre abilità tecniche, orgogliosi dei risultati raggiunti e del nostro impegno nel portare a termine questo progetto.

# Bibliografia

- [1] Nicola Schiavoni, Paolo Bolzern e Riccardo Scattolini *Fondamenti di controlli*, McGraw-Hill Companies, IV edizione.
- [2] <https://www.centropiaggio.unipi.it/sites/default/files/course/material/Veicoli.pdf>
- [3] <http://robot2.disp.uniroma2.it/~fmartine/RobLab/appuntiLezioni.htm>
- [4] <https://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/IN1060/v21/arduino/arduino-projects-book.pdf>
- [5] <https://www.youtube.com/@Dronebotworkshop>