

# Veicolo auto-bilanciato

Laboratorio di Sistemi Meccatronici II

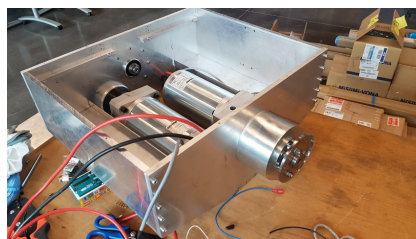
A.A. 2019/2020

## Indice

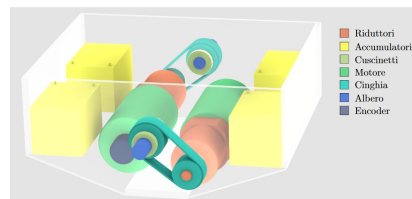
|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Masse e dimensioni del sistema</b>               | <b>1</b> |
| 1.1      | Dati del passeggero . . . . .                       | 3        |
| <b>2</b> | <b>Motore DC e riduttore</b>                        | <b>3</b> |
| 2.1      | Motore DC . . . . .                                 | 3        |
| 2.2      | Riduttore epicicloidale e cinghia dentata . . . . . | 4        |
| <b>3</b> | <b>Hardware</b>                                     | <b>4</b> |
| 3.1      | Azionamenti . . . . .                               | 4        |
| 3.2      | Sensori . . . . .                                   | 5        |
| 3.2.1    | Encoder . . . . .                                   | 5        |
| 3.2.2    | Sensore di corrente . . . . .                       | 6        |
| 3.2.3    | Piattaforma inerziale . . . . .                     | 6        |
| <b>4</b> | <b>Controllo</b>                                    | <b>6</b> |

## 1 Masse e dimensioni del sistema

La struttura del veicolo auto-bilanciato è composta schematicamente da tre componenti: la base d'appoggio, sulla quale sono posizionati i circuiti elettrici e sono calettati i motori; l'asta, la quale, formata da un tubolare d'acciaio, svolge la funzione di manubrio; e le ruote connesse ai motori per mezzo di una trasmissione a cinghia e di una epicicloidale.

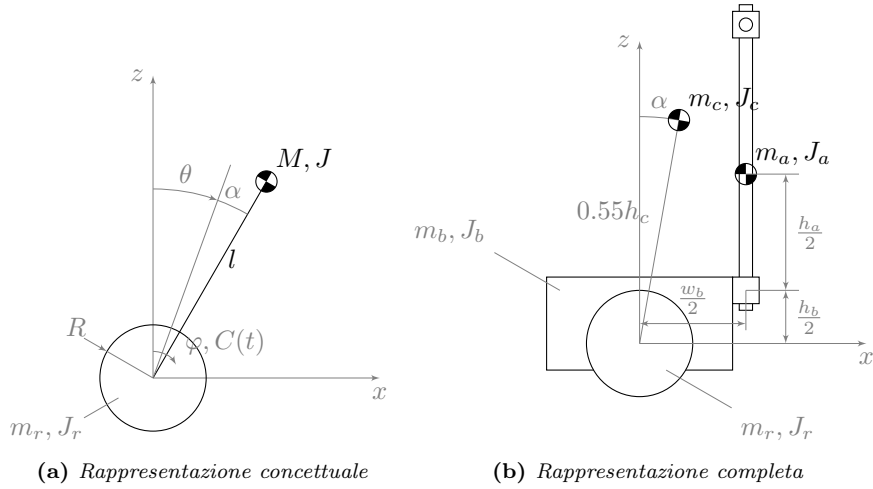


(a) Struttura della base



(b) Modello schematico della base

**Figura 1:** Rappresentazione della base del veicolo auto-bilanciato.



**Figura 2:** Rappresentazione schematica del modello del veicolo auto-bilanciato

Al sistema sopra descritto vanno aggiunte quattro batterie al piombo da 12 V del peso di 3,6 kg l'una.

Il tutto è disposto, con eccezione dell'asta la quale sposta evidentemente il baricentro in avanti di un angolo  $\alpha$ , in modo simmetrico così da avere il baricentro del sistema privo di asta posizionato sull'asse  $z$ .

I parametri che descrivono tali componenti sono per l'asta:

- la massa dell'asta stessa: 3,5 kg;
- l'inerzia dell'asta: 0,1669 kg m<sup>2</sup>;
- la sua lunghezza ( $h_a$ ): 1,4 m;
- e il suo raggio: 20 mm.

Mentre per la base che è schematizzabile come parallelepipedo si riscontrano le seguenti misure:

- Massa della base: 20 kg;
- Inerzia della base: 0,6667 kg m<sup>2</sup>;
- Larghezza della base: 0,6 m;
- Profondità della base ( $w_b$ ): 0,5 m;
- Altezza della base ( $h_b$ ): 0,2 m.

La quale presenta un baricentro posizionato 0,1 m sotto il baricentro delle ruote, ovvero in  $z = -0.1$  nel sistema di coordinate in figura.

Per ultimo la ruota è da assumersi come un cilindro caratterizzata dai seguenti parametri:

- Massa della ruota: 3 kg;
- Inerzia della ruota: 0,1452 kg m<sup>2</sup>;
- Raggio della ruota: 0,22 m;
- Spessore della ruota: 0,12 m;
- Interasse delle ruote: 0,64 m.

## 1.1 Dati del passeggero



**Figura 3:** Modello multibody composto da un veicolo auto-bilanciato e dal pilota.

Detta  $m_c = 70\text{kg}$  la massa del passeggero e  $h_c = 1.77\text{m}$  l'altezza dello stesso espressa in centimetri, calcolato il suo peso in libbre

$$w_c = 2.20462m_c, \quad (1)$$

il suo momento principale d'inerzia è ricavabile mediante la relazione<sup>1</sup>

$$J_c = (1732353h_c + 619298w_c - 277625773) 10^{-7}, \quad (2)$$

mentre l'inerzia lungo l'asse  $z$  è assumibile come pari a

$$J_{c,z} = \frac{1}{2}m_c(0.25^2 + 0.35^2). \quad (3)$$

Il baricentro del corpo umano può essere considerato posizionato ad un'altezza dalla base d'appoggio equivalente a 0,55 volte l'altezza del corpo stesso.

## 2 Motore DC e riduttore

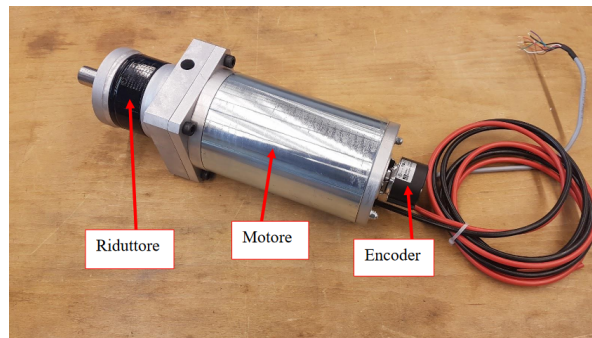
### 2.1 Motore DC

I due motori che movimentano ognuna delle due ruote sono motori a corrente continua a magneti permanenti Raw Planet prodotto da Sinobi Serie 75 PX 053 con tensione nominale di 24V, e definibili ciascuno dalle seguenti caratteristiche:

- Velocità nominale: 2050 rpm;
- Potenza nominale: 870 W;
- Coppia nominale: 3,6 N m;
- Corrente nominale: 37 A;
- Coppia di picco allo spunto: 10,9 N m;
- Corrente di picco: 111 A;

---

<sup>1</sup>Equazione di regressione riportata in John T. Mcconville *et al.*, *Anthropometric Relationships of Body and Body Segment Moments of Inertia* (1980).



**Figura 4:** Motoriduttore con encoder.

- Resistenza totale:  $0,13 \Omega$ ;
- Induttanza:  $0,10 \text{ mH}$ ;
- Costante di coppia:  $0,10 \text{ N m/A}$ ;
- Costante di tensione:  $10,00 \text{ V/krpm}$ ;
- Costante di tempo elettrica:  $1,22 \text{ ms}$ ;
- Momento d'inerzia:  $3,70 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ ;
- Massa:  $8,1 \text{ kg}$ ;
- Massimo carico radiale:  $380 \text{ N}$ ;
- Massimo carico assiale:  $110 \text{ N}$ .

## 2.2 Riduttore epicicloidale e cinghia dentata

Ognuno di tali motori viene collegato alle ruote mediante un riduttore epicicloidale con rapporto di trasmissione  $0.1$  e, a valle di questa mediante una cinghia con profilo HTD la quale presenta:

- Passo della cinghia:  $8 \text{ mm}$ ;
- Interasse delle pulegge:  $0,1 \text{ m}$ ;
- Numero di denti della puleggia dell'albero in ingresso:  $22$ ;
- Numero di denti della puleggia dell'albero in uscita:  $26$ .

# 3 Hardware

## 3.1 Azionamenti

Gli azionamenti dei motori (i quali sono alimentati a  $12 \text{ V}$ ) sono formati da driver comandanti i gate del ponte H. Tali integrati sono due: DRV8701P (montato sul driver che pilota il motore destro) e DRV8701E (montato sul driver che pilota il motore sinistro).

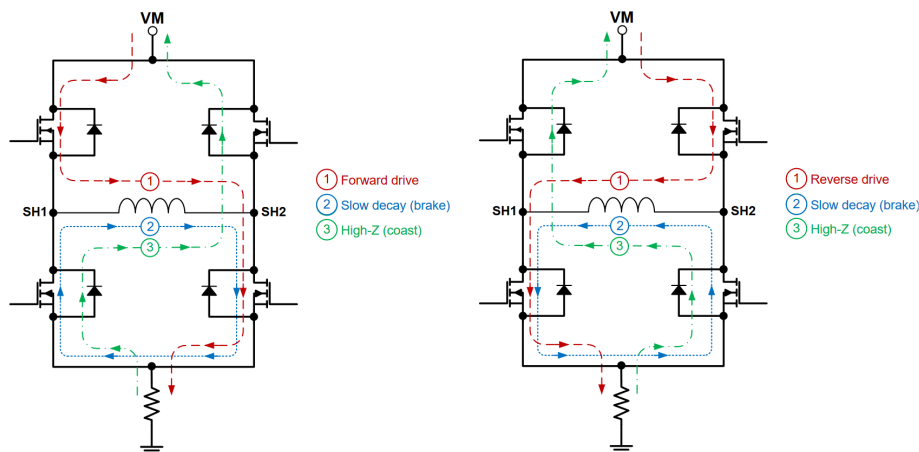
La versione DRV8701E è comandata dagli input digitali enable e phase, mentre la versione DRV8701P è del tutto analogica e differisce dalla prima in quanto è realizzata per permettere di controllare il motore attraverso la modalità PWM non avendo gli input enable e phase, bensì gli input IN1 e IN2.

Utilizzando la versione DRV8701E si può quindi controllare il driver mediante le modalità indicate dalla seguente tabella.

| EN | PH | Descrizione                         |
|----|----|-------------------------------------|
| 0  | -  | Frenata                             |
| 1  | 0  | Movimentazione in direzione inversa |
| 1  | 1  | Movimentazione in direzione diretta |

Invece, utilizzando la versione DRV8701P il driver diviene controllabile mediante le modalità indicate dalla tabella che segue.

| IN1 | IN2 | Descrizione                         |
|-----|-----|-------------------------------------|
| 0   | 0   | Ponte H disabilitato (da evitarsi)  |
| 0   | 1   | Movimentazione in direzione inversa |
| 1   | 0   | Movimentazione in direzione diretta |
| 1   | 1   | Frenata                             |



**Figura 5:** Rappresentazione degli stati operazionali del ponte H.

## 3.2 Sensori

I sensori presenti sul veicolo auto-bilanciato sono: un encoder per ogni ruota, una piattaforma inerziale, e un sensore di corrente per ogni motore.

### 3.2.1 Encoder

L'encoder, che risulta calettato rigidamente sull'albero motore, è di tipo incrementale e ha una risoluzione di 2048 bit al giro.

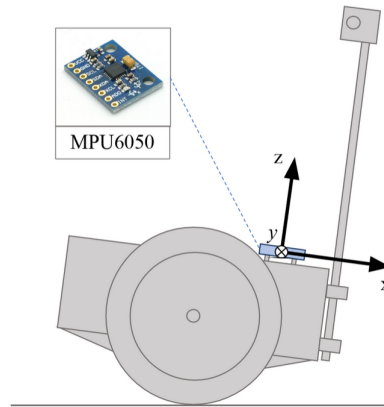
Questo sensore viene letto per mezzo del Line Receiver v. 1.0.0, il quale dispone dei canali A, B e Z (quest'ultimo non vien utilizzato da questa applicazione).

### 3.2.2 Sensore di corrente

Il sensore di corrente permette la lettura del valore di corrente attraverso un segnale analogico tra 0 V e 5 V, dove un valore nullo di corrente viene indicato da una lettura pari a 2,5 V.

Tale operazione viene svolta attraverso una resistenza di sense del valore di 1 mΩ e un amplificatore operazionale con un guadagno di 200.

### 3.2.3 Piattaforma inerziale



**Figura 6:** Rappresentazione schematica della posizione della piattaforma inerziale sul veicolo auto-bilanciato.

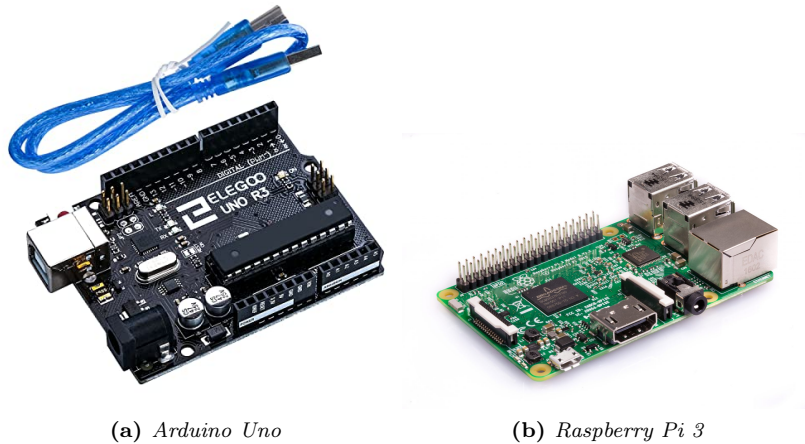
La piattaforma inerziale è il modello InvenSense MPU6050, il quale comunica esclusivamente attraverso il bus I<sup>2</sup>C i valori letti dal giroscopio e dall'accelerometro.

Tali valori sono letti sui tre assi cartesiani utilizzando 16 bit mediante quattro distinti range di misura, ai quali corrispondono – ovviamente – altrettanti range di sensibilità della misura, indicati dalla seguente tabella.

| Range di misura<br>del giroscopio<br>$\left[\frac{^\circ}{s}\right]$ | Sensibilità del<br>giroscopio<br>$\left[\text{LSB} \left(\frac{^\circ}{s}\right)^{-1}\right]$ | Range di misura<br>dell'accelerometro<br>$[g]$ | Sensibilità<br>dell'accelerometro<br>$\left[\frac{\text{LSB}}{g}\right]$ |
|--|---|--|--|
| ±250   | 131   | ±2   | 16 384   |
| ±500   | 65,5  | ±4   | 8192   |
| ±1000  | 32,8  | ±8   | 4096   |
| ±2000  | 16,4  | ±16  | 2048   |

## 4 Controllo

Il sistema di controllo è realizzato mediante tre Arduino Uno e un Raspberry Pi 3.



**Figura 7:** Microcontrollori utilizzati.

Tali schede programmabili vengono utilizzate per svolgere quattro distinte funzioni, ovvero: impostare i guadagni dell'algoritmo di controllo da remoto attraverso il protocollo di comunicazione industriale OPC-UA; realizzare la logica dell'algoritmo di controllo; controllare l'azionamento che pilota il motore di destra; e controllare l'azionamento pilotante il motore di sinistra.

La prima operazione, ovvero settare i guadagni da remoto viene svolta attraverso il Raspberry sul quale è installato il sistema operativo in linea di comando Raspbian 10.

Il Raspberry nell'ambito della comunicazione per mezzo del protocollo OPC-UA svolge la funzione di server, al quale è possibile collegarsi attraverso Wi-Fi per mezzo di un client; mentre nell'ambito della comunicazione con l'Arduino svolgente la funzione di master, il quale deve svolgere la seconda delle funzioni elencate, ossia realizzate la logica dell'algoritmo di controllo, il Raspberry Pi comunica per mezzo del cavo seriale USB.

L'Arduino master, oltre a comunicare con il Rasperri Pi, comunica con gli altri due Arduino attraverso i pin seriali degli stessi, ovvero il pin 0 (RX) e il pin 1 (TX); mentre i pin utilizzati dall'Arduino svolgente la funzione di master, nell'ambito della comunicazione con gli slave, sono il 3 (RX) e il 5 (TX) per lo slave che pilota l'azionamento di sinistra; mentre sono il pin 2 (RX) e 4 (TX) per lo slave che pilota l'azionamento destro.

Oltre a soddisfare le esigenze di comunicazione tra i vari dispositivi che stabiliscono la logica di controllo l'Arduino master provvede alla lettura della piattaforma inerziale attraverso i pin SDA (Serial Data) e SCL (Serial Clock), corrispondenti rispettivamente ai pin analogici A4 e A5, sfruttando il protocollo di comunicazione I<sup>2</sup>C.

Gli altri due Arduino provvedono, oltre a pilotare gli azionamenti dei motori, alla lettura dell'encoder del motore comandato dallo stesso, attraverso i canali A e B dello stesso (il canale Z non viene utilizzato), i quali sono connessi rispettivamente ai pin digitali 2 e 4 dell'Arduino. Provvede, congiuntamente a ciò, alla lettura del sensore di corrente attraverso il pin analogico A0 col quale è connesso.

Mentre i collegamenti tra i sensori di corrente o gli encoder e gli Arduino

sono presenti sugli stessi pin sia per l'Arduino pilotante l'azionamento destro che per quello pilotante l'azionamento sinistro, i pin con cui sono collegati agli azionamenti stessi data la loro differente natura sono diversi a seconda dell'Arduino, ovvero l'Arduino sinistro pilota l'enable col pin 5 e la fase col pin 10, e quello destro pilota l'input IN1 dell'azionamento col pin 5 e l'input IN2 col pin 6.