



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE
MATEMATICHE

CORSO DI LAUREA IN: INGEGNERIA MECCANICA

PROGETTAZIONE FUNZIONALE DI UN
ROBOT MOBILE OMNIDIREZIONALE
*FUNCTIONAL DESIGN OF AN
OMNIDIRECTIONAL MOBILE ROBOT*

Studente:
Vittorio Nocchi

Relatore:
DOTT. ING. LUCA CARBONARI

Correlatore:
PROF. MASSIMO CALLEGARI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SOMMARIO

| | |
|--|----|
| SOMMARIO | 2 |
| ELENCO DELLE TABELLE..... | 4 |
| ELENCO DELLE FIGURE | 5 |
| INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI | 6 |
| 1.1 Mecanum Wheel..... | 6 |
| 1.2 Scopo della tesi | 8 |
| 1.3 Metodo analitico | 10 |
| CAPITOLO 2 ANALISI CINEMATICA DEL ROBOT | 11 |
| 2.1 Ellissoide di manipolabilità in velocità..... | 11 |
| 2.2 Analisi dello schema di velocità | 13 |
| 2.3 Modello cinematico | 14 |
| CAPITOLO 3 ANALISI STATICA DEL ROBOT | 16 |
| 3.1 Modello statico semplificato..... | 16 |
| 3.2 Modello statico-dinamico | 18 |
| CAPITOLO 4 ANALISI DINAMICA DEL ROBOT | 20 |
| 4.1 Modello semplificato | 20 |
| 4.2 Dimensionamento | 20 |
| CAPITOLO 5 SCELTA DEGLI AZIONAMENTI: MOTORE E RIDUTTORE | 23 |
| 5.1 Motore..... | 23 |
| 5.2 Riduttore | 24 |
| 5.3 Accoppiamento motore-riduttore..... | 25 |
| 5.4 Verifiche dinamiche..... | 26 |
| 5.4.1 Caso di moto su piano orizzontale a velocità nominale..... | 26 |
| 5.4.2 Caso di moto su piano inclinato a velocità nominale..... | 28 |
| 5.4.3 Verifica partenza da fermo a pendenza massima..... | 29 |
| CAPITOLO 6 PROGETTAZIONE MECCATRONICA | 30 |

| | |
|---|----|
| 6.1 Schema mecatronico | 30 |
| 6.2 Microcontrollore | 31 |
| 6.3 Driver | 31 |
| 6.4 Encoder | 32 |
| 6.5 Convertitore DC/DC e batteria | 32 |
| CONCLUSIONI | 34 |
| Caratteristiche richieste al robot | 34 |
| Caratteristiche ottenute e riflessioni..... | 34 |
| Possibili applicazioni future..... | 35 |
| BIBLIOGRAFIA | 36 |

ELENCO DELLE TABELLE

| | |
|--|----|
| Tabella 1, Masse dei componenti..... | 16 |
| Tabella 2, Dati tecnici motore Maxon | 24 |
| Tabella 3, Dati riduttore Maxon..... | 25 |
| Tabella 4, Dati encoder Maxon..... | 32 |

ELENCO DELLE FIGURE

| | |
|--|----|
| Figura 1, Morfologia mecanum wheel..... | 7 |
| Figura 2, Schema delle velocità sui rulli della ruota..... | 8 |
| Figura 3, Modello semplificato del robot..... | 8 |
| Figura 4, Braccio robotico UR5e | 9 |
| Figura 5, Schema dimensionale dell'UR5e | 9 |
| Figura 6, Esempio di mecanum wheel utilizzabile | 10 |
| Figura 7, Ellissoide di manipolabilità in velocità..... | 13 |
| Figura 8, Andamento della velocità angolare del robot | 14 |
| Figura 9, Modello statico semplificato | 17 |
| Figura 10, Modello statico-dinamico | 18 |
| Figura 11, Modello semplificato di blocco su piano orizzontale | 20 |
| Figura 12, Zone di funzionamento del motore..... | 25 |
| Figura 13, Modello semplificato di blocco su piano inclinato..... | 28 |
| Figura 14, Schema mecatronico | 30 |

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

La robotica presenta numerosi campi di impiego, ma quello in cui si è maggiormente inserita è il settore della produzione industriale, con piattaforme mobili e bracci robotici. Per circoscrivere un significato più preciso al termine, la normativa ISO TR/8373-2.3 definisce il robot industriale come:

Un manipolatore con più gradi di libertà, governato automaticamente, riprogrammabile, multiscopo, che può essere fisso sul posto o mobile per utilizzo in applicazioni di automazioni industriali.

La robotica mobile è un campo giovane; le sue radici includono molte discipline ingegneristiche e scientifiche, dall'ingegneria meccanica, elettrica ed elettronica a quella informatica, cognitiva e delle scienze sociali. I robot mobili possono essere programmati per eseguire un percorso ben preciso o più in generale per raggiungere una destinazione X partendo da un'origine Y. Nel primo caso si parla più propriamente di robot AGV (Automatic Guided Vehicle) ovvero di dispositivi in grado di percorrere un tracciato in modo autonomo ma non in grado di operare variazioni al percorso stesso in casi di ostacoli, mentre, nel secondo caso, si parla di AMR (Autonomous Mobile Robot), al robot in questione è indicato solamente l'obiettivo da raggiungere ed un possibile tracciato ideale, dopo di che, in caso di ostruzioni al passaggio, sarà l'AMR a trovare un tracciato alternativo per raggiungere la meta finale. Sebbene l'uso industriale dei robot mobili sia al giorno d'oggi il più diffuso soprattutto nei magazzini, nei centri di distribuzione e di produzione, le caratteristiche di questo tipo di robot ne rendono possibile l'applicazione anche nel settore agricolo, militare, in campo medico, dell'assistenza personale e della sicurezza. Anche l'esplorazione e la navigazione degli oceani e dello spazio sono tra i compiti portati avanti da sofisticati esemplari di robot mobili.

1.1 Mecanum Wheel

I robot mobili presentano diverse tecniche di movimentazione, le più comuni si basano sull'utilizzo di ruote in numero variabile che consentono al dispositivo di spostarsi sul piano con 3 gradi di libertà. Parlando di oggetti in moto nel piano è necessario introdurre il concetto di olonometricità: nella robotica la olonometricità si riferisce al rapporto fra i gradi della libertà di

un dato dispositivo. In particolare, se i gradi di libertà controllabili sono uguali ai gradi di libertà totali allora il robot viene detto olo-nomico. Se i gradi della libertà controllabili sono meno dei gradi di libertà totali allora, al contrario, è non-olonomico. Per fare un esempio, un'automobile che si muove in strada è un dispositivo non-olonomico in quanto, nonostante possieda tutti e tre i gradi di libertà planari, non è possibile controllare singolarmente ognuno di esse in quanto questi risultano vincolati tra di loro. L'auto infatti, dotata di ruote anteriori sterzanti, non è in grado di muoversi in direzione parallela agli assali in quanto richiede sempre un raggio di sterzata. Un robot può diventare olo-nomico grazie all'utilizzo di particolari ruote in grado di garantire il moto omnidirezionale mediante il controllo singolare di ogni mozzo. Le ruote omnidirezionali sono state utilizzate nella robotica, nell'industria e nella logistica per molti anni conferendo ai veicoli molteplici vantaggi in termini di mobilità in spazi ristretti e ambienti affollati e migliorando la capacità di eseguire facilmente determinate attività in condizioni difficili (ambienti con ostacoli statici, dinamici o aree ristrette).

Tra le ruote omnidirezionali più utilizzate vi sono le mecanum wheels, progettate e inventate in Svezia, nel 1975, da Bengt Ilon, un ingegnere della società svedese Mecanum AB. La mecanum wheel si basa sul principio di ruota centrale munita di rulli disposti ad angolo intorno al perimetro della stessa. L'angolo tra l'asse dei rulli e l'asse centrale delle ruote potrebbe assumere un valore qualsiasi, ma nella maggior parte delle applicazioni si utilizza una inclinazione convenzionale di 45° mentre la morfologia dei rulli è tale da conferire alla ruota una sagoma circolare, come è possibile notare nella seguente immagine:

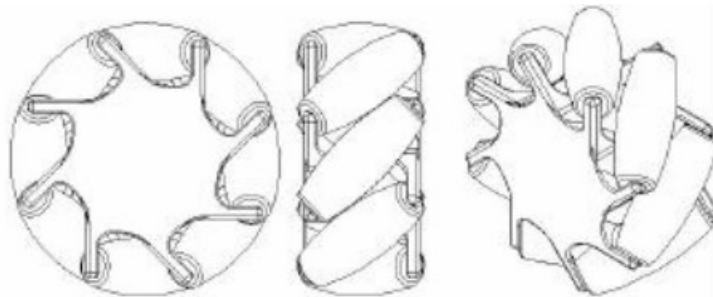


Figura 1, Morfologia mecanum wheel

L'angolazione dei rulli consente di dividere parte della forza generata dal contatto con la superficie di appoggio nella direzione di rotazione della ruota e parte in direzione normale ad essa. Al variare della forza risultante su ogni singola ruota si otterrà un vettore complessivo sul dispositivo in qualsiasi direzione desiderata, permettendo così alla piattaforma di muoversi liberamente in modo solidale al vettore forza risultante, senza cambiare l'inclinazione della ruota.

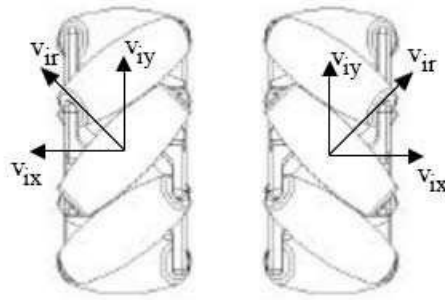


Figura 2, Schema delle velocità sui rulli della ruota

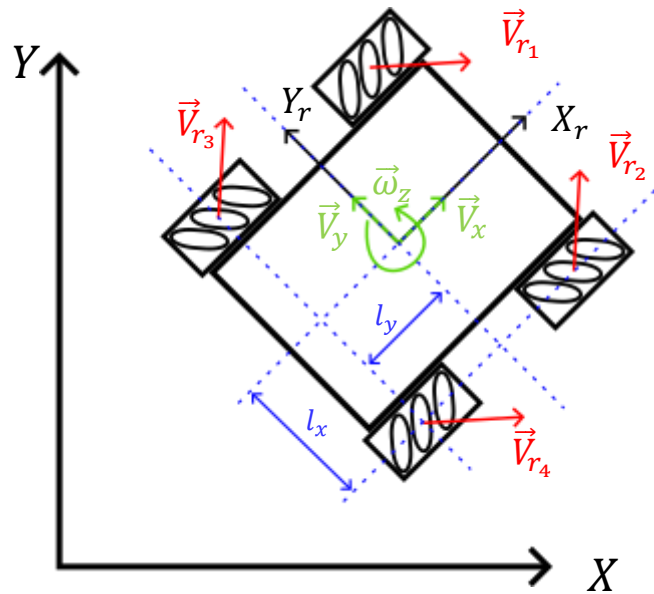


Figura 3, Modello semplificato del robot

1.2 Scopo della tesi

La seguente tesi ha lo scopo di progettare un robot mobile che utilizzi come elementi rotanti delle mecanum wheels azionate singolarmente da 4 motoriduttori indipendenti. Complessivamente si desidera realizzare una piattaforma dalle dimensioni non eccessive che possa essere utilizzata prevalentemente in ambito universitario e di ricerca. Al fine di rendere il progetto più funzionale e di interesse accademico si prevede anche l'innesto di un braccio robotico sopra al pianale del dispositivo mobile; questo consentirà al robot di afferrare e spostare oggetti in maniera del tutto autonoma o controllata nel caso in cui si decida di inserire un controllore manuale di guida. Il braccio scelto per questa applicazione è un UR5e prodotto dalla Universal Robot; è un segmento intermedio tra il più piccolo UR3e e il più prestante UR10e e per questo adatto a questo progetto in termini di ingombro, massa e performance.

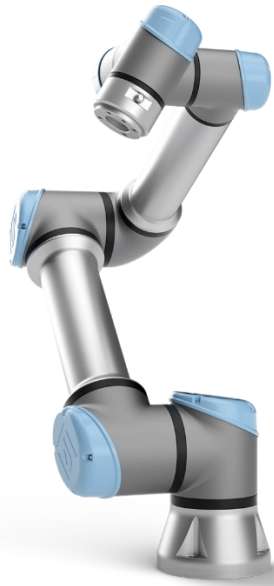


Figura 4, Braccio robotico UR5e

L'UR5e è in grado di sollevare carichi fino a 5 kg ed ha una massa complessiva di 20,6 kg alla quale bisogna però sommare quella della componentistica elettronica (altri 10 kg circa). Il braccio dovrà essere in grado di spostare oggetti posizionati su piani di lavoro e di conseguenza sarà di interesse valutare la massima altezza raggiungibile dal robot in configurazione di distensione completa.

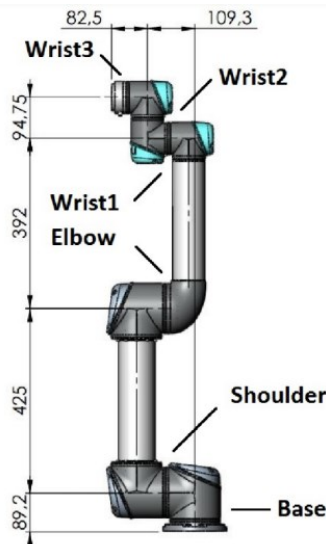


Figura 5, Schema dimensionale dell'UR5e

Considerando la massa del telaio, dell'elettronica e del braccio caricato al massimo (5 kg) si desidera che complessivamente il sistema non superi i 70 kg e che le dimensioni siano il più

contenute possibile in modo da garantire spostamenti in spazi stretti e poco agevoli. Il robot avrà come altre specifiche una velocità nominale, su superficie piana e orizzontale, pari a 1 m/s raggiungibile con una accelerazione massima di 1 m/s^2 e come mecanum wheels si utilizzerà un modello con anima metallica, in grado di sopportare il carico verticale, con diametro di 150 mm , spessore di circa 8 mm e massa di 0.5 kg .



Figura 6, Esempio di mecanum wheel utilizzabile

1.3 Metodo analitico

Il processo che porterà alla completa caratterizzazione funzionale del robot prevede una prima fase di analisi cinematica; questa consentirà di determinare il campo di movimento del dispositivo e, note le dimensioni delle ruote e le prestazioni stabilite in precedenza, di ricavare il valore della velocità angolare agli alberi della quattro ruote. La seconda fase prevede invece uno studio statico del dispositivo, atto alla determinazione dei parametri dimensionali di ingombro del robot; a tale proposito si eseguiranno diverse prove in condizioni di massima instabilità e si ricaveranno le misure dei lati del telaio portante. Nota la cinematica e la statica si proseguirà con l'analisi dinamica che consentirà di dimensionare, nella quarta fase, gli azionamenti, nota la velocità e la accelerazione angolare ai mozzì delle ruote. Una volta scelta la configurazione di motori e riduttori in grado di garantire il funzionamento in condizioni nominali e di prevedere anche un modesto margine di sovraccarico, si concluderà la trattazione con l'analisi mecatronica ovvero si determineranno i componenti elettronici e i vari collegamenti interni con consentiranno alla piattaforma di essere controllata, programmata e mobilitata.

Capitolo 2

ANALISI CINEMATICA DEL ROBOT

2.1 Ellissoide di manipolabilità in velocità

Lo studio della cinematica del robot si pone come obiettivo quello di determinare la relazione tra il vettore delle velocità angolari degli singoli alberi dei quattro motori, $\dot{\mathbf{q}}$, e il vettore dei compiti $\dot{\mathbf{p}}$. In particolare:

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad \dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$$

dove con $\dot{\theta}_i$ si intende la velocità angolare dell'albero motore i -esimo, con \dot{x} e \dot{y} si rappresenta rispettivamente la velocità di traslazione del robot mobile lungo le direzioni principali \hat{x} e \hat{y} ed infine $\dot{\gamma}$ definisce la velocità angolare di rotazione dello stesso attorno al terzo asse principale \hat{z} . Considerando inizialmente l'insieme delle velocità degli alberi di modulo unitario è possibile scrivere:

$$\dot{\mathbf{q}}^T \dot{\mathbf{q}} = 1 \tag{1.1}$$

La relazione tra i due vettori $\dot{\mathbf{q}}$ e $\dot{\mathbf{p}}$ si ottiene introducendo una matrice Jacobiana tale che:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}} \tag{1.2}$$

Sostituendo questa relazione nella (1.1) si arriva a definire l'equazione di un ellissoide il quale prende il nome di "ellissoide di manipolabilità in velocità" e le cui superfici rappresentano il set di velocità, nello spazio di lavoro, che soddisfa l'equazione (1.1).

Nel caso del robot mobile omnidirezionale, da noi trattato, la matrice Jacobiana \mathbf{J} è nota e a termini costanti. La sua espressione è data da:

$$\mathbf{J} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{(l_x + l_y)} & \frac{1}{(l_x + l_y)} & -\frac{1}{(l_x + l_y)} & \frac{1}{(l_x + l_y)} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Dove R è il raggio della mecanum wheel utilizzata, l_x è la metà della distanza tra le ruote anteriori o posteriori, mentre l_y è la metà della distanza tra le ruote anteriori e posteriori.

L'ellissoide di manipolabilità in velocità così ottenuto è definito dall'equazione:

$$\dot{\mathbf{q}}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \dot{\mathbf{q}} = 1 \quad (1.4)$$

da cui, studiando la matrice $\mathbf{J}\mathbf{J}^T$, si ricavano le direzioni degli assi principali dell'ellissoide, \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} , determinate dagli autovettori della $\mathbf{J}\mathbf{J}^T$, mentre le dimensioni σ_i degli stessi sono date da:

$$\sigma_i(\mathbf{J}) = \sqrt{\lambda_i(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)} \quad (1.5)$$

dove $\lambda_i(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)$ rappresenta l' i -esimo autovalore di $\mathbf{J}\mathbf{J}^T$.

Sostituendo i dati di progetto, noti per il nostro robot, è possibile ottenere una rappresentazione grafica dello spazio delle velocità all'interno del quale potrà muoversi il dispositivo, ovvero l'ellissoide di manipolabilità in velocità.

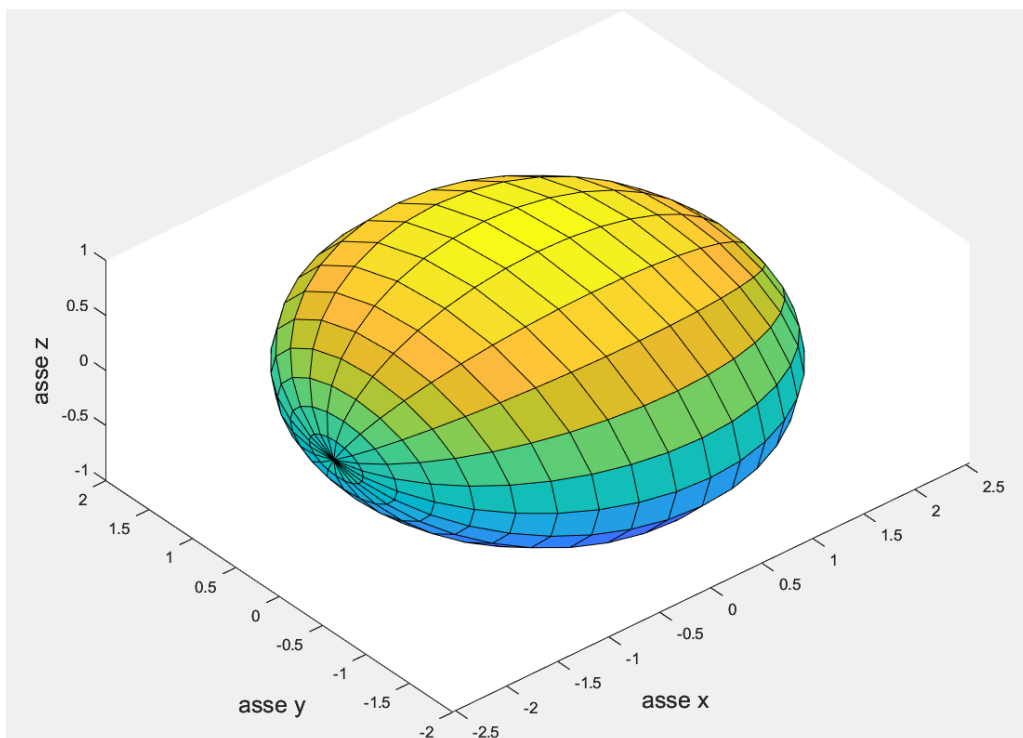


Figura 7, Ellissoide di manipolabilità in velocità

2.2 Analisi dello schema di velocità

L'ellissoide che si ottiene attraverso l'analisi precedente presenta i due semiassi relativi alle velocità di traslazione del robot, semiasse x e y, congruenti, definendo quindi delle sezioni ortogonali all'asse della velocità angolare $\dot{\gamma}$, asse z, di forma circolare. Il risultato ottenuto esplicita la capacità del robot di muoversi in ogni direzione del piano con la stessa velocità di traslazione massima, \dot{x}_{max} e \dot{y}_{max} , la quale sarà però funzione della velocità di rotazione angolare $\dot{\gamma}$ richiesta. Dal grafico si nota infatti come la sezione dell'ellissoide, e quindi il valore della velocità di traslazione, sia massima in corrispondenza del valore $\dot{\gamma} = 0$ per poi diminuire con andamento ellittico all'aumentare di $\dot{\gamma}$ fino al raggiungimento del valore nullo in corrispondenza di $\dot{\gamma}_{max}$.

Sia $V = \dot{x}_{max} = \dot{y}_{max}$ la massima velocità di traslazione del robot, la relazione che lega la V alla $\dot{\gamma}$ è data da:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{c^2 \left(1 - \frac{V^2}{a^2}\right)}$$

(1.6)

con a = semiasse dell'ellissoide relativo alla velocità $\dot{x} = \dot{y}$

c = semiasse dell'ellissoide relativo alla velocità angolare $\dot{\gamma}$

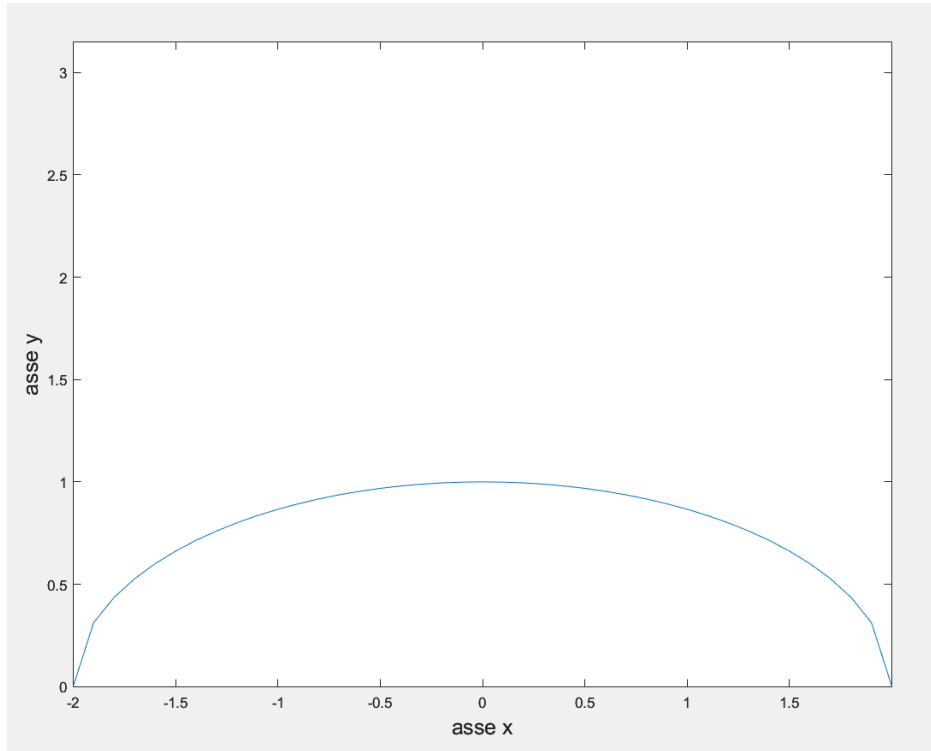


Figura 8, Andamento della velocità angolare del robot

Come è possibile osservare dal grafico sopra, l'andamento della $\dot{\gamma}$ al variare della V presenta un rapido incremento per piccole diminuzioni di V mentre tende a stabilizzarsi attorno alla $\dot{\gamma}_{max}$ per diminuzioni di V di maggiore entità.

2.3 Modello cinematico

In conclusione, si riporta la relazione tra $\dot{\mathbf{q}}$ e $\dot{\mathbf{p}}$ richiesta all'inizio della trattazione e ottenuta mediante la matrice Jacobiana \mathbf{J} :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ -\frac{1}{(l_x + l_y)} & \frac{1}{(l_x + l_y)} & -\frac{1}{(l_x + l_y)} & \frac{1}{(l_x + l_y)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix}$$

(1.7)

Dalla quale, ricorrendo alla pseudo-inversa di Moore-Penrose:

$$\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \quad (1.8)$$

si ottiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & 1 & (l_x + l_y) \\ 1 & 1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & -1 & (l_x + l_y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Noto lo schema cinematico del robot, è facile determinare la direzione di moto del robot per la quale è necessaria la massima velocità di rotazione delle ruote. Sostituendo i dati di progetto nel programma Matlab atto alla risoluzione della cinematica del robot si ottiene il valore:

$$\dot{\theta}_{i_{max}} \approx 19 \text{ rad/s} \quad (1.10)$$

La massima velocità richiesta ai motori al fine di soddisfare la richiesta di velocità di traslazione del robot pari a 1 m/s è quindi di circa 19 rad/s , valore ottenuto per un angolo di traslazione pari a 45° .

Capitolo 3

ANALISI STATICA DEL ROBOT

3.1 Modello statico semplificato

Avendo analizzato la cinematica del robot, prima di proseguire nello studio della dinamica e nella scelta degli azionamenti, al fine di un dimensionamento più accurato, risulta essenziale un'analisi statica del dispositivo oggetto della presente tesi. A tale scopo è possibile realizzare un modello statico mediante la conoscenza delle masse e degli ingombri dei componenti del robot. Si riporta innanzitutto una tabella riassuntiva delle masse in gioco:

| Componente | Massa [gr] | Quantità | TOT. |
|---------------------------------|-------------|----------|-----------|
| Ruota | 600 | 4 | 2.400 |
| Motore + riduttore | 300 | 4 | 1.200 |
| Encoder | 5 | 4 | 20 |
| Driver | 20 | 2 | 40 |
| Convertitore DC/DC | 300 | 1 | 300 |
| Teensy | 10 | 1 | 10 |
| Raspberry | 50 | 1 | 50 |
| Batteria | 4.000 | 1 | 4.000 |
| Telaio ed elementi di fissaggio | 30.000 | | 30.000 |
| Massa complessiva [kg] | | | 38 |

Tabella 1, Masse dei componenti

Note le masse dei componenti, è possibile creare 3 macro gruppi:

- Gruppo azionamenti (motore, riduttore, encoder e ruota): $M_{tot_1} = 3,62 \text{ kg}$
- Gruppo elettronica (driver, convertitore, Teensy, Raspberry, batteria): $M_{tot_2} = 4,4 \text{ kg}$
- Gruppo telaistico (struttura portante ed elementi di fissaggio): $M_{tot_3} = 30 \text{ kg}$

Prima di analizzare la staticità del robot nella situazione più sfavorevole, ovvero quella in cui il dispositivo stia decelerando al massimo dei dati di progetto, con il braccio caricato e completamente disteso lungo il lato corto della piattaforma, è utile effettuare un test

preliminare di staticità del robot in assenza di forze di inerzia. Si riporta un modello semplificato considerando esclusivamente le forze peso dei componenti:

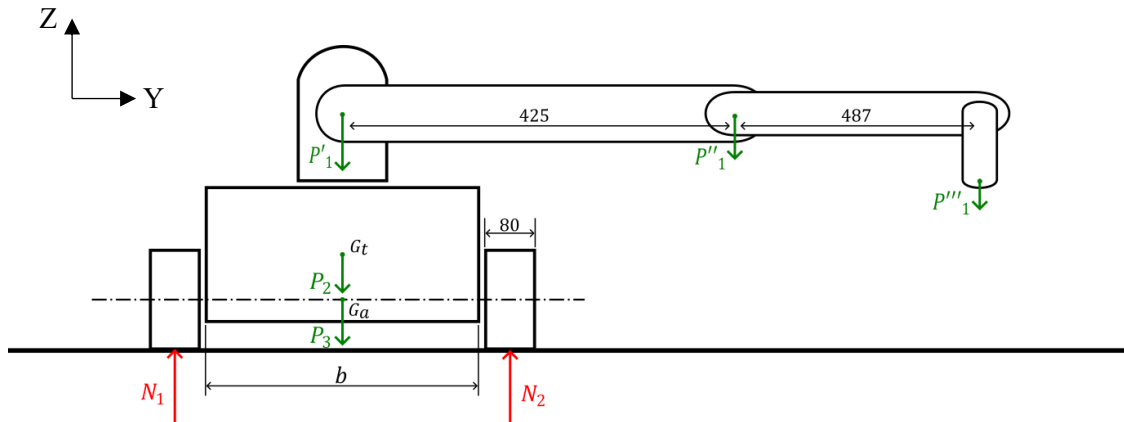


Figura 9, Modello statico semplificato

Il parametro da dover ricavare è rappresentato da b ovvero dalla dimensione del lato corto della piattaforma. I carichi riportati nel modello sopra rappresentano:

- $P_1 = 25g \text{ N}$ peso del braccio robotico, suddiviso in tre componenti poste nelle tre coppie rotoidali principali:
 - $P'_1 = 10g \text{ N}$
 - $P''_1 = 8g \text{ N}$
 - $P'''_1 = 7g \text{ N}$
 - $P_2 = 34,4g \text{ N}$ peso del gruppo telaistico e elettronico, applicato nel baricentro G_t relativo a tali masse, nell'ipotesi che l'elettronica sia disposta simmetricamente lungo il lato b
 - $P_3 = 3,62g \text{ N}$ peso del gruppo azionamenti applicato nel baricentro G_a relativo a tali masse
- ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$ rappresenta l'accelerazione di gravità)

Definiti i carichi e note le dimensioni dei componenti, è possibile impostare il sistema risolvibile che permette di ricavare la misura di b che evita il ribaltamento della piattaforma. A tal proposito si considera la situazione di incipiente di ribaltamento imponendo la $N_1 = 0$, e si imposta l'equilibrio alla rotazione attorno al punto di applicazione di N_2 che, in questo caso, corrisponde con l'estremo destro di appoggio della ruota.

Dalla risoluzione dell'equazione di equilibrio si ottiene $b = 150,5 \text{ mm}$, un valore piuttosto modesto considerando le prestazioni del robot il quale però è in linea con le aspettative data la

manca delle forze d'inerzia. Inseriamo quindi questi contributi eseguendo una seconda prova di stabilità mediante equilibrio alla rotazione attorno allo stesso polo utilizzato in precedenza.

3.2 Modello statico-dinamico

Si procede quindi con una seconda analisi statica dalla quale ci aspettiamo un valore del lato b maggiore, dovuto alle forze di ribaltamento generate dalle masse traslanti durante la frenata della piattaforma. A tal proposito si riporta il nuovo modello semplificato:

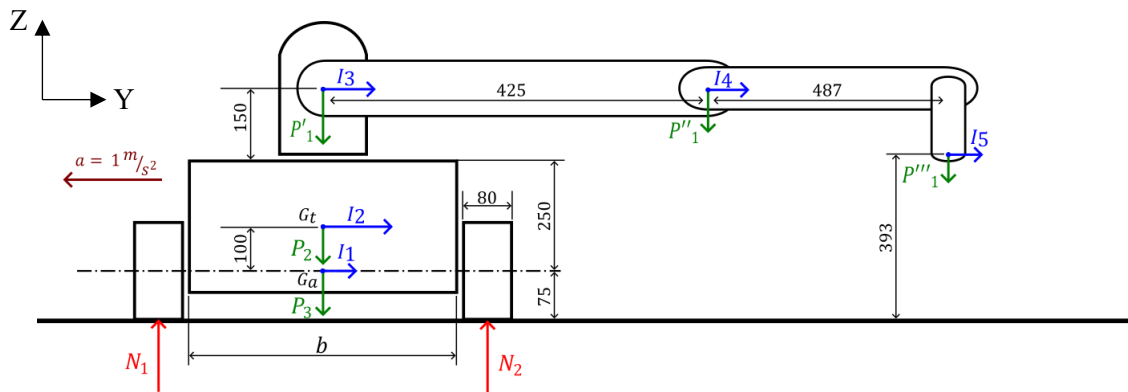


Figura 10, Modello statico-dinamico

A differenza del modello in Figura 9, è possibile notare come in questo caso siano presenti le forze, contrassegnate in blu, dovute alla decelerazione pari a 1 m/s^2 . Dalla risoluzione dell'equilibrio alla rotazione, note le forze di inerzia pari al prodotto delle singole masse per l'accelerazione del sistema, si ottiene un nuovo valore di $b \approx 210 \text{ mm}$.

Il risultato è quindi in linea con le aspettative, rispetto all'analisi svolta in precedenza si ha infatti un aumento del lato b pari a circa 6 cm . In base a questo parametro è possibile conoscere l'ingombro complessivo della piattaforma che, considerando lo spessore delle mecanum wheels, avrà un larghezza di 37 cm e una lunghezza che può essere scelta in base alle esigenze di ingombro dei componenti accessori al robot come ad esempio l'elettronica relativa al braccio robotico, ma comunque non inferiore ai 37 cm . Per quanto riguarda lo sviluppo verticale del dispositivo, il quale è progettato per essere in grado di afferrare oggetti rialzati rispetto al terreno, questo raggiunge i 138 cm in configurazione di massima distensione del braccio. Tuttavia, in caso di applicazioni in cui sia richiesta una quota di carico maggiore, è possibile posizionare il braccio alcune decine di centimetri più in alto (fino a

40/50 cm) mantenendo un valore b comunque piuttosto modesto, a patto che il baricentro del gruppo telaistico, che rappresenta la massa più elevata in gioco, rimanga il più basso possibile.

Capitolo 4

ANALISI DINAMICA DEL ROBOT

4.1 Modello semplificato

La dinamica del robot può essere semplificata con quella di un blocco di massa M_{tot} che trasla su un piano, trascurando i fattori di interferenza esterna come l'attrito tra le ruote e la superficie che, nel caso di basse velocità, assume dimensioni irrilevanti rispetto alle inerzie e alle masse in gioco. In particolare, i valori di velocità e accelerazione definiti tra le specifiche fanno riferimento al moto su una superficie piana e orizzontale.

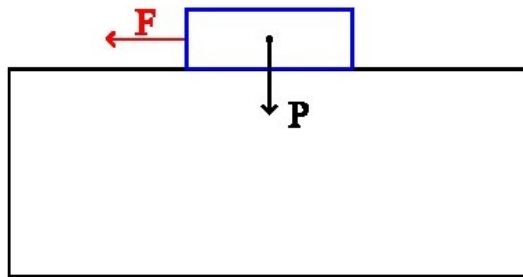


Figura 11, Modello semplificato di blocco su piano orizzontale

La forza F generata dai motori può quindi essere calcolata considerando la seconda legge della dinamica, nota la massa e l'accelerazione del blocco. Una volta ricavata la forza F richiesta, e scelto il tipo di mecanum wheel da utilizzare (definiti quindi il raggio e la massa della ruota), sarà possibile calcolare la coppia motrice necessaria su ciascun albero motore.

4.2 Dimensionamento

Di seguito si riporta quindi una breve trattazione atta alla determinazione delle coppie motrici necessarie sui quattro assi motori del robot al fine di vincere il carico richiesto.

Dai dati di progetto è nota la massa complessiva del robot a pieno carico la quale sarà data dalla somma della massa del robot M_r e quella del carico massimo M_{cmax} .

Si ottiene quindi:

$$M_{tot} = M_r + M_{c_{max}} = 70kg \quad (2.1)$$

La massima accelerazione del dispositivo, considerando il caso di carico massimo, è un parametro di progetto noto, $a_{max} = 1 \text{ m/s}^2$, dal quale è possibile determinare il valore della coppia una volta definite le caratteristiche della ruota.

Scelta, in particolare, una mecanum wheel con 15 cm di diametro, si ottiene una coppia complessiva pari a:

$$C_{max} = F_{max} \cdot R \quad (2.2)$$

dove R rappresenta il raggio della mecanum wheel mentre F_{max} corrisponde alla massima forza scambiata tra le quattro ruote e la superficie di appoggio, al fine di ottenere un'accelerazione $a_{max} = 1 \text{ m/s}^2$ con una massa $M_{tot} = 70kg$:

$$F_{max} = M_{tot} a_{max} = 70N \quad (2.3)$$

Sostituendo questo dato nella (2.2) si ricava il valore della coppia massima complessiva:

$$C_{max} = 5,25 Nm \quad (2.4)$$

Ipotizzando, con buona approssimazione, che la coppia così ottenuta venga equamente distribuita sui quattro motori si ricava la coppia unitaria C_u , sulla singola ruota, pari ad un quarto di quella massima complessiva:

$$C_u = 1,32 Nm \quad (2.5)$$

Analizzando lo schema cinematico e quello dinamico si ottengono, per il robot, i due parametri essenziali alla determinazione della corretta combinazione di motore e riduttore ovvero il valore di coppia e velocità massima:

$$C_u = 1,32 \text{ Nm}$$

$$\dot{\theta}_{i_{max}} \approx 19 \text{ rad/s}$$

Capitolo 5

SCelta DEGLI AZIONAMENTI: MOTORE E RIDUTTORE

L'elevato valore di coppia richiesto ai motori applicati sul robot, richiede l'utilizzo di un riduttore in grado di elevare il valore di coppia nominale all'uscita dell'albero fino al dato di progetto ottenuto nel capitolo precedente. L'altra prerogativa è quella di garantire una velocità di rotazione all'uscita del riduttore tale da soddisfare la richiesta di $\dot{\theta}_{i_{max}}$ ricavata durante lo studio della cinematica del robot. Considerando l'eventualità di moto del dispositivo su una superficie non perfettamente piana, sarà essenziale cautelarsi, mediante la scelta di coppie motrici nominali superiori a quelle di progetto, per compensare l'innalzamento della curva di carico sui motori in presenza di lievi pendenze del terreno. Analizzando diverse aziende produttrici di sistemi di azionamento per robot mobili, la scelta è ricaduta su Maxon Motor, azienda svizzera che fornisce sistemi di alta precisione adatti all'applicazione qui trattata.

5.1 Motore

Il motore selezionato è il DCX26L GB KL, dispositivo alimentato a corrente continua in grado di fornire una coppia nominale di 57.8 mNm ad un regime di rotazione di 9690 rpm . Nello specifico si è scelta un'alimentazione a 24 V in modo da rendere il sistema compatibile con le tensioni di alimentazione dei più comuni bracci robotici previsti per una futura applicazione come già preannunciato nell'introduzione. Il motore sarà sollecitato ad elevati regimi di rotazione con coppie altrettanto consistenti, ragion per cui il DCX26L GB KL è stato scelto nella sua versione più performante, la High Power, con commutazione in spazzole in graffite e cuscinetti a sfere precaricati. La potenza richiesta alle ruote è data da:

$$P = C_u \dot{\theta}_{i_{max}} \approx 25W \quad (3.1)$$

I motori selezionati erogano una potenza di $40W$, per cui si può considerare la scelta effettuata sufficientemente cautelativa rispetto a possibili sovraccarichi del dispositivo. Altri due parametri fondamentali per la progettazione dello schema elettrico riguardano le correnti di alimentazione e di spunto del motore. Nel caso del DCX26L GB KL, la corrente che circola in regime stazionario è pari a $2.76 A$ mentre la corrente di picco richiesta all'accensione dell'impianto elettrico è pari a $32.4 A$. Sarà quindi necessario un sistema di controllo dei motori che riesca a garantire una corrente in uscita sufficiente all'avviamento dei motori. Di seguito si riporta una tabella con i principali dati e specifiche tecniche del motore scelto:

| Valori con tensione nominale | |
|--|-------------------------|
| Tensione nominale | 24 V |
| Velocità a vuoto | 10700 min^{-1} |
| Corrente a vuoto | 65.7mA |
| Velocità nominale | 9690 min^{-1} |
| Coppia nominale (coppia max. continuativa) | 57.8 mNm |
| Corrente nominale (corrente max. continuativa) | 2.76 A |
| Coppia di stallo | 695 mNm |
| Corrente di avviamento | 32.4 A |
| Efficienza max. | 90.7 % |

Tabella 2, Dati tecnici motore Maxon

5.2 Riduttore

Il riduttore selezionato è il GPX26HP, di tipo epicicloidale con riduzione a due stadi, il quale, accoppiato al motore DCX26L GB KL, permette di ottenere valori all'uscita dell'albero motore allineati con le richieste progettuali. Il rapporto di riduzione ottimale per questa applicazione è il 35:1 con il quale si raggiunge una coppia nominale di $2.023 Nm$ e una velocità nominale di $200 rpm$. In base al valore di potenza ricavato con la (3.1), il riduttore dovrà essere in grado di lavorare ad una potenza minima di circa $25 W$; per questa ragione il GPX26, che nella sua versione base riuscirebbe a trasmettere una potenza massima di $24 W$, è stato scelto in configurazione High Power, così come il motore, la quale conferisce al riduttore la capacità di gestire una potenza massima di $60 W$, valore più che cautelativo per questa applicazione.

| Dati riduttore | |
|--|------------------------|
| Rapporto di riduzione | 35:1 |
| Rapporto di riduzione assoluto | 4554/130 |
| Numero di stadi | 2 |
| Coppia max. continuativa | 3,00 Nm |
| Coppia consentita per breve tempo | 4 Nm |
| Senso di rotazione, azionamento-uscita | = |
| Efficienza max. | 75 % |
| Gioco riduttore medio senza carico | 1 ° |
| Momento di inerzia | 3,922 gcm ² |
| Max. potenza trasferibile continuativa | 60 W |
| Potenza max. trasmissibile intermittente | 75 W |

Tabella 3, Dati riduttore Maxon

5.3 Accoppiamento motore-riduttore

La scelta di entrambi i componenti in configurazione High Power, oltre a garantire il corretto funzionamento del robot a livello di coppie e velocità trasmesse alle ruote, permette di ottenere un assemblaggio estremamente compatto con un diametro di 26 mm, una lunghezza di 105 mm (140 mm compreso l'albero) e un peso complessivo di 293 gr; valori ottimali per l'applicazione del motoriduttore su di un robot mobile di taglia media.

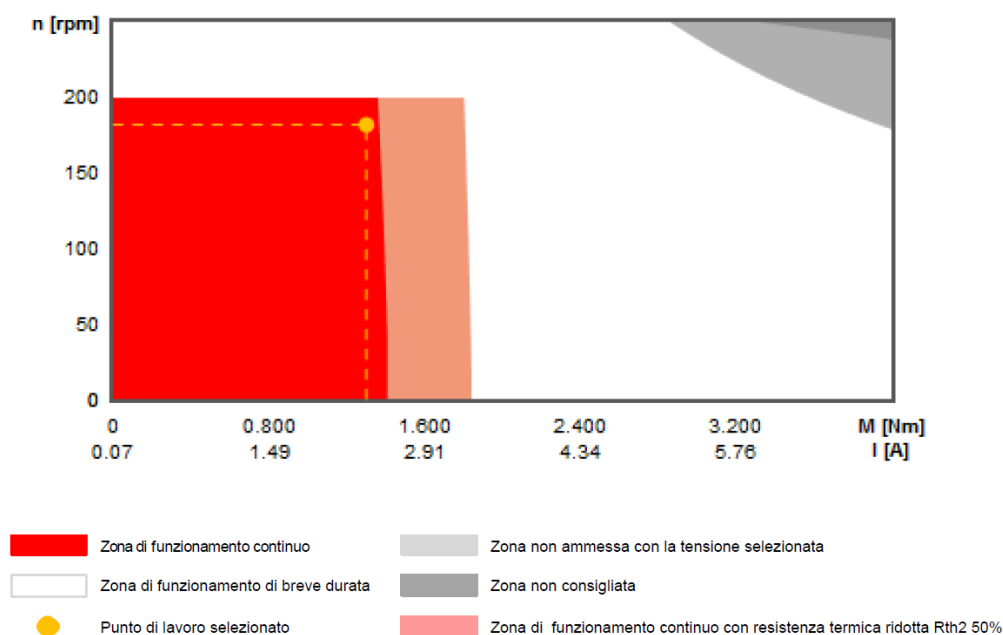


Figura 12, Zone di funzionamento del motore

La figura 12 mostra il grafico di funzionamento del motoriduttore configurato come descritto in precedenza, suddividendo le varie zone di funzionamento contrassegnandole con colori

differenti. Come atteso, la zona di funzionamento in condizioni continuative, evidenziata in rosso, arriva ad un valore di coppia di circa $2 Nm$ e di velocità pari a $200 m/s$. Il punto di funzionamento, definito dai parametri progettuali, ricade all'interno del campo di applicazione continuativa il che conferma la corretta scelta del sistema di azionamento garantendo anche un certo margine di sicurezza. Oltre i valori nominali limite, il motore riesce comunque ad azionare il robot mobile ma non in modo continuativo, ciò significa che uno stress del genere può essere sopportato esclusivamente per brevi periodi, in modo intermittente, consentendo al dispositivo di oltrepassare ostacoli o vincere carichi straordinari, i quali richiedono tendenzialmente uno spunto di coppia maggiore ai $2 Nm$.

5.4 Verifiche dinamiche

Ricollegandoci a quanto detto sopra, è possibile approfondire la dinamica del robot verificando innanzitutto la correttezza della scelta del motore. La specifica di coppia ottenuta con la (2.5) è infatti un valore approssimativo che non tiene conto delle inerzie in gioco, in particolare quella della massa traslante, costituita dalla massa del robot e del carico, quella delle ruote e quella del motore in rotazione. È quindi necessario verificare che il motore scelto soddisfi realmente la richiesta di coppia motrice reale, nota la massa complessiva del robot e l'inerzia degli azionamenti.

5.4.1 Caso di moto su piano orizzontale a velocità nominale

L'equazione di moto dell'accoppiamento motore-utilizzatore ridotta al carico (o all'albero lento) è nota:

$$\frac{\eta}{\tau} M_m - M_u = \left(\frac{\eta}{\tau^2} J_m + J_u \right) \dot{\omega}_u \quad (3.2)$$

Dove:

$\eta = 0.75$, rendimento del riduttore fornito dal produttore

$\frac{1}{\tau} = 35$, rapporto di trasmissione

M_m è la coppia motrice che si vuole determinare

$M_u = 0$, momento resistente, in una prima analisi di moto sul piano con pendenza nulla è possibile approssimarlo uguale a zero

$J_m = 21.4 \cdot 10^{-7} kgm^2$, inerzia del motore fornita dal produttore

J_u è l'inerzia del carico sul singolo motore

$\dot{\omega}_u$ è l'accelerazione angolare delle ruote del robot

Il calcolo di J_u è possibile grazie alla relazione:

$$J_u = J_r + J_c = \frac{1}{2} m_r r^2 + \frac{M_{tot} r^2}{4}$$

In cui J_r e J_c rappresentano rispettivamente l'inerzia della ruota e l'inerzia della massa traslante, m_r è la massa della singola ruota ed r ne è il raggio, mentre M_{tot} è la massa totale ricavata dalla (2.1). Sostituendo i dati noti, si ottiene:

$$J_u = 0.1 \text{ kgm}^2 \quad (3.3)$$

Allo stesso modo la $\dot{\omega}_u$ può essere ricavata attraverso la relazione che lega la velocità angolare di un corpo a quella del proprio centro di massa, $a_{cm} = 1 \text{ m/s}$; nel caso della ruota è possibile approssimare la geometria a quella di un cilindro di raggio r , per cui si ottiene:

$$\dot{\omega}_u = \frac{a_{cm}}{r} = 13.33 \text{ rad/s}^2 \quad (3.4)$$

Noti tutti i parametri sopra elencati, è possibile ricavare il valore di coppia motrice necessaria ad azionare il robot, dalla (3.2) si ricava:

$$M_m = \frac{\tau}{\eta} \left[\left(\frac{\eta}{\tau^2} J_m + J_u \right) \dot{\omega}_u \right] = 51.7 \text{ mNm} \quad (3.5)$$

In base alle specifiche del motore scelto è noto il valore della massima coppia erogabile in maniera continuativa pari a 57.8 mNm , valore superiore a quello necessario ricavato sopra, è quindi possibile affermare che il motore scelto sia adeguato all'applicazione qui trattata.

5.4.2 Caso di moto su piano inclinato a velocità nominale

Dato che, come ricavato dall'analisi precedente, la coppia del motore scelto è maggiore di quella necessaria al robot per spostarsi in condizioni nominali in pianura, è possibile calcolare il valore di pendenza massima del terreno che i motori sono in grado di affrontare.

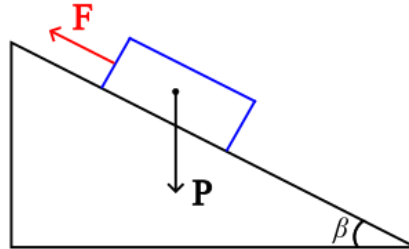


Figura 13, Modello semplificato di blocco su piano inclinato

L'analisi è quindi riconducibile a quella di un blocco di massa M_{tot} posto su un piano inclinato di un angolo β . In questo caso, a differenza dell'analisi svolta nel paragrafo precedente, sarà presente una forza resistente rappresentata dalla componente parallela al piano della forza peso P . L'azione frenante di questa forza avrà effetto sui singoli motori mediante una coppia resistente M_u . Per il calcolo della pendenza β_{max} che il robot può affrontare a velocità nominale, si consideri la (3.2) in cui M_u questa volta sarà diverso da zero e pari a:

$$M_u = \frac{M_{tot}gr}{4} \sin \beta \quad (3.6)$$

Esplicitano il parametro $\sin \beta$ nella (3.2) si ricava:

$$\sin \beta = \frac{\frac{\eta}{\tau} M_m - \left(\frac{\eta}{\tau^2} J_m + J_u \right) \dot{\omega}_u}{\frac{M_{tot}gr}{4}} \quad (3.7)$$

In cui, a differenza del caso precedente, la M_m è un dato noto e pari alla coppia nominale del motore Maxon Motor scelto. Sostituendo quindi i parametri a secondo membro della (3.7) si ottiene il valore di $\sin \beta$ dal quale, attraverso l'operatore inverso è possibile determinare il valore della massima pendenza del piano inclinato:

$$\beta_{max} = 6.77^\circ \quad (3.8)$$

5.4.3 Verifica partenza da fermo a pendenza massima

Avendo ricavato il valore della massima pendenza che il dispositivo sarebbe in grado di percorrere in maniera continuativa in condizioni di pieno carico, è possibile verificare che il robot possa vincere la suddetta pendenza partendo da fermo e accelerando con $a_{max} = 1 \text{ m/s}^2$ fino al valore di velocità nominale. In questo caso la coppia richiesta al motore non sarà più quella nominale ma sarà quella massima erogabile, ovvero la coppia di stallo. Il funzionamento a coppia massima non è certo da considerarsi come una condizione prolungabile nel tempo, si ha infatti che il driver che aziona il motore solitamente interrompe la circolazione di corrente dopo circa 4/5 s. Nella applicazione qui trattata il robot accelera a 1 m/s^2 , il che significa complessivamente impiega 1 s per raggiungere la velocità nominale di 1 m/s ; i motori avranno quindi tutta la corrente necessaria a raggiungere il valore di coppia di stallo. Verifichiamo quindi che questa coppia sia sufficiente all'accelerazione richiesta al robot. Isolando l'accelerazione $\dot{\omega}_u$ dalla (3.2) si ricava:

$$\dot{\omega}_{u_{max}} = \frac{\frac{\eta}{\tau} M_m - M_u}{\frac{\eta}{\tau^2} J_m + J_u} \quad (3.9)$$

Sostituendo i parametri noti, di cui $M_m = 0.695 \text{ Nm}$ rappresenta la coppia di stallo ricavabile dalle specifiche del motore Maxon Motor, si ottiene:

$$\dot{\omega}_{u_{max}} = 164.8 \text{ rad/s}^2 \quad (3.10)$$

Il valore di accelerazione ricavato è di gran lunga superiore a quello richiesto dalle specifiche ottenuto dalla (3.4) e pari a 13.33 rad/s^2 , ciò dimostra che il robot è in grado di raggiungere la velocità nominale di 1 m/s partendo da fermo e accelerando a $\dot{\omega}_{u_{max}}$ su un piano inclinato di $\beta_{max} = 6.77^\circ$.

Capitolo 6

PROGETTAZIONE MECCATRONICA

6.1 Schema meccatronico

Terminata l'analisi cinematica, statica e dinamica e scelti gli azionamenti necessari a muovere il robot con le prestazioni stabilite all'inizio di questa trattazione, rimane da progettare il sistema elettronico di controllo dei motori e di comunicazione con il computer di programmazione. A tale proposito si analizza la catena meccatronica facendo riferimento al seguente schema:

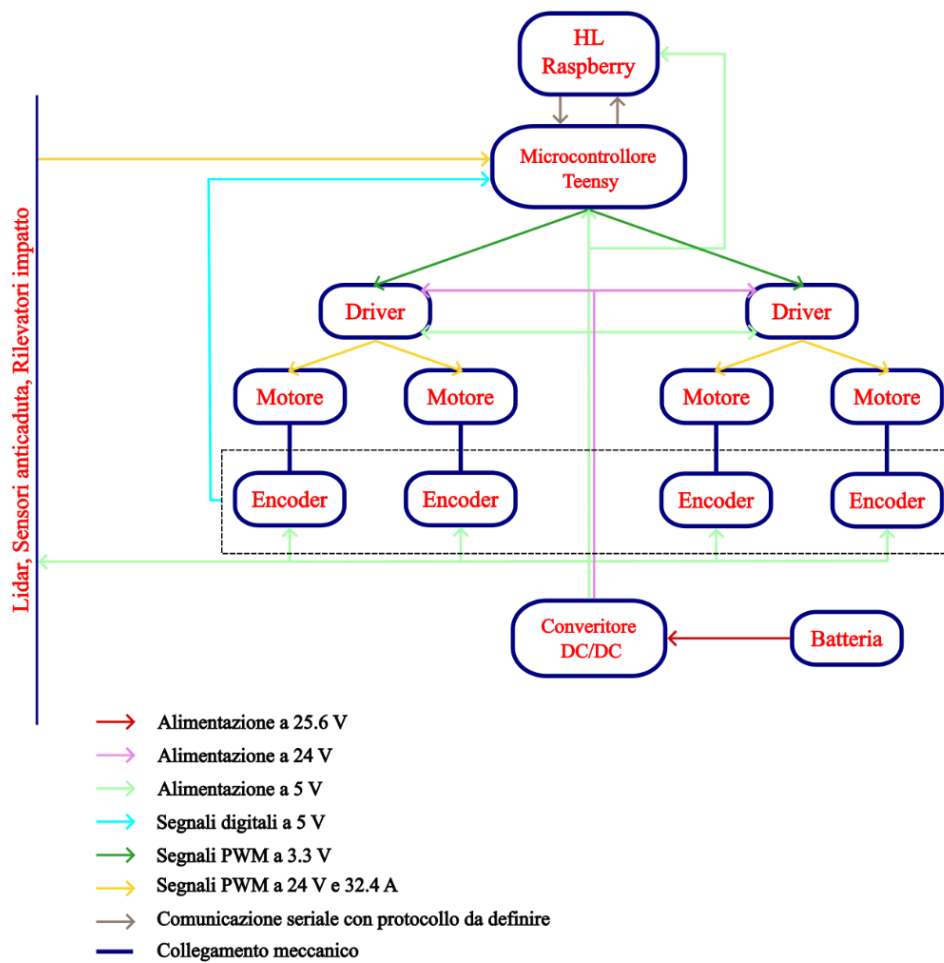


Figura 14, Schema meccatronico

La mappa meccatronica ci mostra il processo di interazione e scambio dati tra la logica di controllo e i motori. La comunicazione avviene mediante elementi interposti che si scambiano segnali elettronici a tensioni differenti e che, complessivamente, consentono agli azionamenti di modulare la cinematica e la dinamica del robot. Andando a percorrere la gerarchia elettronica mostrata nella mappa, partendo dall'alto, si ha in cima alla "piramide" la logica di controllo la quale rappresenta un computer vero e proprio nel quale si inserisce il programma informatico da dover svolgere e dal quale si ottengono le informazioni in uscita dal robot: analisi cinematiche, mappe planimetriche, statistiche dei rilevamenti e molti altri dati ricavati dai sensori dei quali il dispositivo sarà accessoriato.

6.2 Microcontrollore

La logica di controllo comunica con il microcontrollore che riceve costantemente informazioni dai sensori installati nel robot e impartisce comandi agli azionamenti. Per questa applicazione è stato scelto un microcontrollore Teensy 3.5 prodotto dalla PJRC il quale lavora ad una frequenza di 120 MHz. La decisione di utilizzare questa scheda invece di un più comune microcontrollore Arduino risiede nel tipo di pins di cui è munita la Teensy; tutti e 64 i pins digitali della scheda sono infatti caratterizzati dalla tecnologia Interrupt. Questi possono quindi eseguire uno scambio dei dati notevolmente alleggerito e velocizzato; il pin interrupt ha la capacità di limitare la ricezione di un segnale alle sole variazioni dello stesso; il suo funzionamento, in altre parole, è lo stesso di un trigger in un sistema di misura, associa la ricezione del segnale ad un evento deterministico trascurando tutto ciò che non risponde all'input atteso. Il segnale al quale si fa riferimento è quello in uscita dagli encoders e può essere interpretato in chiave binaria come una sequenza di 1 e 0; il microcontrollore riceverebbe quindi costantemente serie di cifre binarie da ognuno dei 4 encoders per una quantità elevatissima di informazioni al secondo. Il pin interrupt invece permette alla Teensy di ricevere il segnale solamente quando questo è pari ad 1 e di trascurare tutti quegli istanti in cui, al contrario, vale 0, alleggerendo notevolmente il flusso di informazioni.

6.3 Driver

Come spiegato sopra, il microcontrollore riceve in input segnali digitali a 5 V dagli encoders e, in risposta, manda segnali PWM a 3.3 V ai drivers che a loro volta convertiranno questi segnali in input finali per i motori andando a modificare la direzione, velocità, e accelerazione del moto del robot. Il driver è dunque l'elemento di congiunzione tra il

controllore e il motore, è provvisto di due inputs, uno di alimentazione e uno di comunicazione con la Teensy, e di due outputs costituiti dai segnali a 24 V inviati ai motori. Per alimentare e controllare i 4 motori sono quindi necessari 2 drivers e per questa applicazione sono stati scelti i Pololu Dual G2 High Power da 24 V i quali sono in grado di gestire l'alimentazione dei motori presentando una corrente massima di output pari a 50 A mentre, come riportato in Tabella 2, la corrente di avviamento dei Maxon DCX26L GB KL è di 32.4 A. Questo modello di driver presenta inoltre la caratteristica di supportare input sia a 3.3 V che a 5 V il che lo rende estremamente versatile ad applicazioni in cui è essenziale la comunicazione tra componenti con segnali a tensione differente, come in questo caso.

6.4 Encoder

Maxon Motor, oltre a motore e riduttore, fornisce l'encoder abbinato alla combinazione di azionamenti scelta. In base alle esigenze, durante la configurazione è possibile variare il numero di impulsi per giro, andando da un minimo di 1 impulso per giro, fino ad un massimo di 32. L'applicazione dell'encoder sul robot trattato in questa tesi consente di gestire la cinematica e il moto complessivo del dispositivo inviando segnali al microcontrollore come spiegato in precedenza. La sua funzione è quindi quella di misurare velocità e accelerazione all'albero motore che operando in condizioni nominali ad un numero di giri dell'ordine dei $10,000 \text{ min}^{-1}$ non richiede una precisione estremamente elevata e di conseguenza, per questa applicazione, è stato scelto un encoder ENX10 da 12 impulsi per giro, il che significa che complessivamente, da ogni encoder partiranno segnali con una frequenza di circa 2 kHz.

| Dati sensore | |
|----------------------------|-------------------------|
| Numero di impulsi per giro | 12 |
| Numero di canali | 3 |
| Line Driver | RS422 |
| Velocità max. elettrica | 90000 min^{-1} |
| Velocità max. meccanica | 30000 min^{-1} |

Tabella 4, Dati encoder Maxon

6.5 Convertitore DC/DC e batteria

Come spiegato in precedenza, dato l'elevato numero di componenti elettronici e le diverse caratteristiche di ognuno di essi, sono necessari dispositivi che consentano lo scambio di informazioni, mediante segnali digitali, tra di essi. In particolare, come è possibile notare dallo

schema mecatronico in Figura 8, i vari componenti emettono segnali con tensioni differenti: 3.3 V, 5 V e 24 V. Per garantire il corretto funzionamento dell'elettronica e permettere lo scambio dati interno al robot è richiesto un convertitore che partendo dall'alimentazione principale, quella della batteria, sia in grado di abbassare tale tensione a quella richiesta dai singoli componenti. Dal momento che i motori e il braccio robotico richiedono un'alimentazione a 24 V la batteria richiesta avrà un tensione nominale di $25.6 \pm 10\% V$ e da questo valore di input il convertitore dovrà garantire due uscite differenti, una a 3.3 V e l'altra a 5 V. Tutto il sistema elettronico inoltre opererà in corrente continua e di conseguenza il convertitore dovrà semplicemente abbassare la tensione ai morsetti senza passare da corrente continua ad alternata. Al fine del corretto funzionamento dello schema è necessario un dispositivo in grado di erogare la corrente complessiva richiesta dalle singole utenze, a tale proposito, analizzando i dati delle correnti in gioco si nota che il componente che impone il maggior vincolo è il driver che presenta un valore di picco pari a 50 A. Nonostante i motori abbiano una corrente di avviamento di 32.4 A, è importante che il convertitore sia in grado di gestire la massima intensità teoricamente trasmissibile, anche se questo valore non verrà mai raggiunto. A tale proposito, considerando trascurabili gli assorbimenti dovuti a microcontrollore, encoders e sensori accessori, è possibile scegliere il convertitore più adatto, a seconda anche del pacco batterie di alimentazione, tra quelli della linea ad alta potenza prodotta dall'azienda Traco Power.

CONCLUSIONI

Caratteristiche richieste al robot

L'obiettivo del lavoro di tesi era quello di progettare un robot mobile omnidirezionale da utilizzare nella facoltà di Ingegneria Meccanica presso il Politecnico delle Marche ad Ancona per scopi didattici; in particolare si trattava di un dispositivo mobile munito di braccio robotico, in grado di afferrare oggetti mediante una pinza e di spostarli nello spazio. Il robot, una volta montato, potrà essere utilizzato come dispositivo sul quale eseguire simulazioni e prove; esso rimarrà a disposizione dell'università per futuri test da parte di studenti, tirocinanti e ricercatori. I vincoli costruttivi riguardavano solo l'ingombro e la massa complessiva che doveva essere al di sotto dei 70 kg ; il braccio robotico inoltre doveva essere in grado di afferrare oggetti rialzati dal terra di almeno 1.2 m . A livello prestazionale il dispositivo doveva potersi spostare con velocità nominale di 1 m/s e accelerazione pari a 1 m/s^2 garantendo la stabilità della piattaforma anche in condizioni di massimo carico e forze inerziali.

Caratteristiche ottenute e riflessioni

Con la prima e terza fase del progetto sono stati determinati i parametri essenziali per il dimensionamento degli azionamenti. La combinazione di motore e riduttore scelta nella quarta fase di questo progetto prevede che il dispositivo possa essere sottoposto ad uno stress maggiore di quello prestabilito nell'introduzione di questa tesi, in questo modo è possibile tutelarsi da surriscaldamenti dei motori e in casi più estremi da avarie. Il punto mostrato in Figura 12 è infatti completamente interno alla zona di funzionamento continuativo che ha come estremi i valori di coppia nominale pari a 2.023 Nm e velocità nominale pari a 200 rpm (come ricavato nel par. §5.2). Il vincolo dei 70 kg di massa complessiva è stato ampiamente rispettato garantendo un margine di sicurezza sulla coppia richiesta all'albero motore e permettendo al dispositivo di muoversi anche su superfici inclinate (con pendenza massima ricavata al par. §5.4.2), condizione di utilizzo molto probabile in future applicazioni del robot. Successivamente, nella seconda fase, sono stati ricavati i valori dimensionali sufficienti a

garantire il corretto funzionamento del dispositivo e, come richiesto da dati progettuali, è stato verificato che l'ingombro complessivo non fosse eccessivo, la piattaforma mobile infatti avrà una larghezza massima inferiore ai 40 *cm* che le consentirà di muoversi con agilità in spazi stretti e inaccessibili a robot più ingombranti, mentre l'altezza raggiungibile dal braccio sarà superiore ai 1.3 *m* e di conseguenza anche il vincolo di quota risulta ampiamente rispettato.

Possibili applicazioni future

Come tutti i progetti anche questo potrà subire, nel tempo, delle migliorie atte a renderlo maggiormente versatile e prestante; a tale proposito il robot è stato pensato per poter accogliere numerosi accessori di possibile interesse accademico. Come mostrato nello schema meccatronico, ad esempio, l'elettronica prevede già la presenza di numerosi sensori come radar, lidar, sensori anticaduta, sensori di movimento e molti altri ancora. L'alimentazione a 24 *V* e il convertitore a 5 e 3 Volt permette infatti a tutta la componentistica accessoria di essere compatibile con l'elettronica già presente e quindi l'inserimento di suddetti sensori sarà piuttosto pratico. Oltre a componenti in grado di migliorare le capacità di movimento del robot sarà possibile accessoriare la piattaforma con ulteriori dispositivi per le più disparate attività di ricerca. Ad esempio potrebbe essere di interesse il posizionamento di particolari telecamere o termocamere in aggiunta o in sostituzione del braccio robotico per ottenere immagini e riprese in ambienti difficilmente accessibili. Altri sensori potranno essere aggiunti per misure termiche, dinamiche, misure di qualità dell'aria, misuratori di spostamento infrarossi e molti altri ancora. Per studi di dinamica del veicolo invece potrebbe essere di interesse l'utilizzo di sensori di carico che rilevino lo stato di stress del telaio in condizioni di massima sollecitazione e in particolari configurazioni di utilizzo. In conclusione, un dispositivo con le caratteristiche dinamiche e statiche come quello progettato in questa tesi presenta una elevata versatilità e flessibilità di utilizzo il che lo renderà facilmente adattabile, in futuro, a nuovi studi accademici.

BIBLIOGRAFIA

- Callegari, M., Fanghella, P., Pellicano, F., *Meccanica applicata alle macchine*, UTET Università, 2017.
- Tagliavini, L., Botta, A., Carbonari, L., Quaglia, G., Gandini, D., Chiaberge, M., *Mechatronic design of a mobile robot for personal assistance*, in “Proceedings of the ASME 2021 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference”, 2021.
- M.K.S.H.Maldeniya, R.C.Madurawe, L.B.H.T.Thilakasiri, T.M.S.Thennakoon, R.M.T.P. Rajakaruna, *Remote controlled 4wd omni directional robot using mecanum wheels*, in “International Research Symposium on Engineering Advancements SAIM, Malabe, Sri Lanka”, 2015.
- Adăscăliței, F., Doroftei, I., *Practical applications for mobile robots based on mecanum wheels - A systematic survey*, in “The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics” 2011.
- Taheri, H., Qiao, B., Ghaeminezhad, N., *Kinematic Model of a Four Mecanum Wheeled Mobile Robot*, in “International Journal of Computer Applications”, 2015.
- Diegel, O., Badve, A., Bright, G., Potgieter, J., Tlale, S., *Improved mecanum wheel design for omni-directional robots*, in “Australasian Conference on Robotics and Automation”
- Rocco, P., *Cinetostatica del robot*, Materiale didattico Politecnico di Milano.