



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI SALERNO

# SynchroDrive

**Dipartimento di Ingegneria Industriale**

**Corso: Analisi di sistemi meccanici  
assistita da calcolatore**

Progettisti:

- Baglivo Giovanni
- Criscuolo Emmanuel
- Di Palma Felice
- Manente Mario
- Vitolo Gianluca

Docenti:

- De Simone Marco
- Guida Domenico
- Naddeo Alessandro

Anno accademico  
2015/2016



## Sommario

Introduzione .....	3
1. Modellazione 3D.....	3
1.1 Applicazioni e specifiche del progetto.....	3
1.2 Schematizzazione del sistema .....	3
1.3 Scelte strutturali .....	4
1.3.1 Albero di trasmissione verticale .....	5
1.3.2 Albero di trasmissione orizzontale.....	5
1.3.3 Sistema di sostegno per ruote dentate .....	5
1.3.4 Profilati.....	6
1.3.5 Carter .....	6
1.3.6 Motori .....	6
1.4 Dimensionamento Motore Passo-Passo .....	7
1.5 Destinata base .....	7
2. Controllo .....	9
2.1 Introduzione al controllo .....	9
2.1.1 Sistemi di controllo in anello aperto ( Feed-Forward ) .....	9
2.1.2 Sistemi di controllo in anello chiuso ( Feed-Back ) .....	10
2.2 Modello Simulink.....	11
2.3 Definizione traiettoria .....	13
2.4 Dinamica inversa.....	15
2.5 Dinamica diretta .....	17
2.6 Dinamica diretta con perturbazione.....	19
2.7 Controllo in closed-loop (PID).....	21
2.8 Conclusioni.....	23

## Introduzione

Il progetto del robot è stato commissionato dai professori M. De Simone D. Guida e A. Naddeo ed è il punto d'arrivo del corso di "Analisi di Sistemi Meccanici Assistita da Calcolatore" tenutosi nell'anno accademico 2014/2015 della facoltà di Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Salerno.

Il progetto consta di due fasi:

- Realizzazione del modello in 3D mediante il software di modellazione grafica SolidWorks;
- Controllo del sistema mediante il software di calcolo Matlab e Simulink.

## 1. Modellazione 3D

### 1.1 Applicazioni e specifiche del progetto

Il robot che ci è stato commissionato è il SynchroDrive, un sistema la cui principale caratteristica è la capacità di garantire avanzamento e sterzata sincrona di tutte le ruote. L'automa sarà impiegato per la realizzazione di perimetri di gioco in campi sportivi e/o per il tracciamento della segnaletica stradale orizzontale. Le principali richieste fatte dai committenti sono di progettare un sistema che sia innanzitutto assemblabile e smontabile, costituito da pezzi, per quanto possibile, standard, reperibili sul mercato e che non occupi più di  $1\text{ m}^2$  di superficie.

### 1.2 Schematizzazione del sistema

Dopo aver riflettuto sulle specifiche richieste si è optato per l'impiego di due motori distinti, uno per il moto di avanzamento del robot, l'altro per la sterzata.

Per la realizzazione del sistema di avanzamento, si è deciso per l'utilizzo di una trasmissione tramite accoppiamenti cinghia-puleggia: il moto viene trasmesso da un motore elettrico ad una puleggia dentata che, a sua volta, metterà in moto le altre tramite la cinghia. Su queste ultime quattro pulegge sono calettati altrettanti alberi, alla cui estremità opposta, verranno montate delle ruote dentate oblique per la trasmissione ad altri alberi, posti perpendicolarmente ai primi, sui quali sono locati gli pneumatici.

Per il sistema di sterzata sincrona è stato scelto di utilizzare cinque ruote dentate, delle quali una posta in posizione centrale, utilizzata per trasmettere il momento. Il rapporto di trasmissione degli ingranaggi scelto è 1:1, ciò non solo semplifica la configurazione meccanica, ma grazie anche all'ausilio di un motore passo-passo, garantisce un'ottima precisione.

Avendo ideato questo meccanismo nel modo precedentemente descritto, si è ritenuto più appropriato conferire al robot una geometria a pianta quadrata.



Figura 1 – Sistema di avanzamento



Figura 2 – Sistema di sterzata

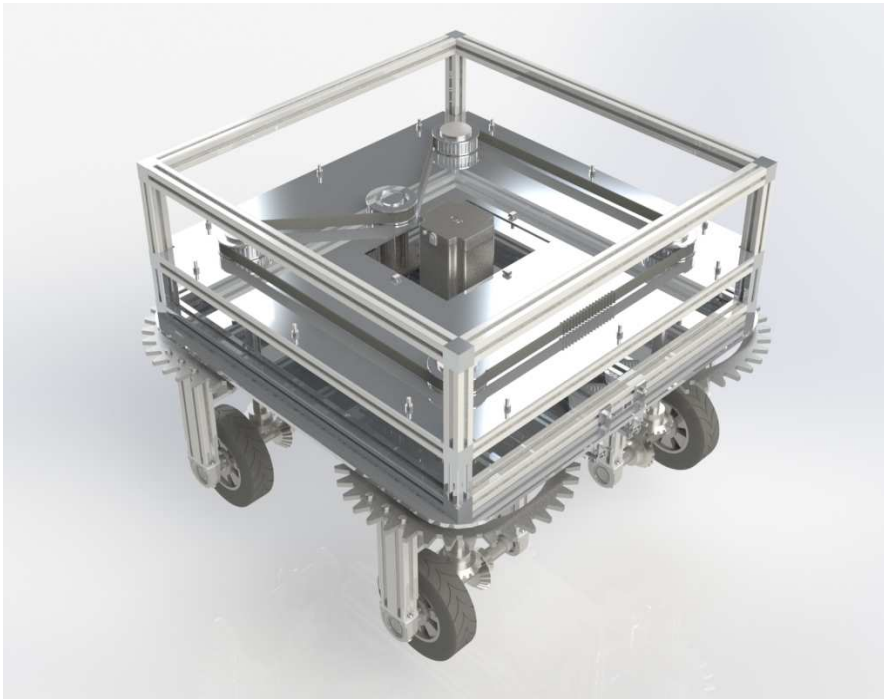


Figura 3 - SynchroDrive

Dopo aver stimato il peso complessivo del device, sono state dimensionate le ruote dentate tenendo conto di tutti i carichi a cui sarebbero state sottoposte: non potendone modificare il diametro, legato alla geometria prestabilita del robot, sono stati praticati dei fori per ridurne il peso. Inoltre è stato praticato un ulteriore foro centrale per permettere il passaggio dell'albero di trasmissione del moto di avanzamento. Al livello superiore risiede il sistema di trasmissione cinghia-pulegge dentate. Per garantire una migliore trasmissione del momento motore, la puleggia motrice è stata fissata nella posizione più centrale possibile, così da aumentare l'angolo di abbraccio. È stata dunque scelta una cinghia a doppia dentatura.

Componente essenziale per qualsiasi mezzo di trasporto, macchinario da lavoro o macchina utensile è il telaio. Esso è la struttura portante che definisce la forma e la posizione delle parti di cui consta la macchina quali componenti meccaniche, elettroniche e motori. Esso è stato realizzato unendo due piastre in alluminio ad un'intelaiatura di profilati Bosh, a sezione quadrata di  $30 \times 30 \text{ mm}$ , con opportuni sistemi di montaggio (connettori a T, L, cubici e angolari). Le piastre hanno il compito di registrare le pulegge e i componenti elettronici, al livello superiore, gli ingranaggi, i motori e la batteria, a quello inferiore. Inoltre, la piastra inferiore, blocca eventuali accessi a polveri e corpi estranei.

### 1.3 Scelte strutturali

Il problema principale riscontrato è stato quello di far coesistere i due sistemi (di avanzamento e di sterzata) nella struttura. La soluzione implementata consiste nell'aver suddiviso la struttura in due livelli sovrapposti. Si è deciso di porre il sistema di sterzata, e quindi le ruote dentate, nell' livello inferiore essendo queste in acciaio. È stato scelto questo materiale perché gli ingranaggi sono fondamentali elementi strutturali.



Figura 4 – Ingranaggio forato

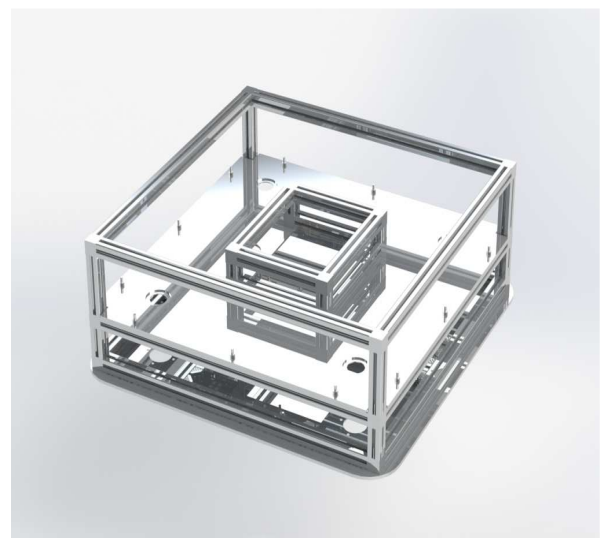


Figura 5 - Telaio

Si vuole ora illustrare brevemente gli accoppiamenti principali tra gli organi destinati a trasmettere moto e i meccanismi di collegamento utilizzati. Si è favorito, per quanto possibile, l'uso di collegamenti facilmente smontabili e che non compromettessero la prec

### 1.3.1 Albero di trasmissione verticale

L' albero di trasmissione verticale ha il compito di trasferire il momento dalle pulegge alle ruote dentate oblique. L'accoppiamento con la puleggia è garantito da una linguetta, sì da non compromettere la coassialità dell' atto di moto rotatorio. All' estremità opposta dell' albero sarà montata una ruota dentata obliqua per mezzo di una spina elastica e una chiavetta.



Figura 6 – Albero di trasmissione verticale

### 1.3.2 Albero di trasmissione orizzontale

La ruota dentata conica dell' albero verticale sarà accoppiata, ovviamente, con un secondo ingranaggio conico posto sull' albero di trasmissione orizzontale. La posizione di questo ingranaggio è registrata, anche in questo caso da una spina elastica e la trasmissione del moto assicurata da una chiavetta. Lo pneumatico, invece, avrà bisogno, per essere registrato, oltre che alla linguetta per la trasmissione della rotazione, anche di due anelli elastici. L' albero per cui presenterà due spallamenti per il suo inserimento in cuscinetti radiali, un foro per la spina elastica, una cava per la linguetta e due scanalature per gli anelli elastici.

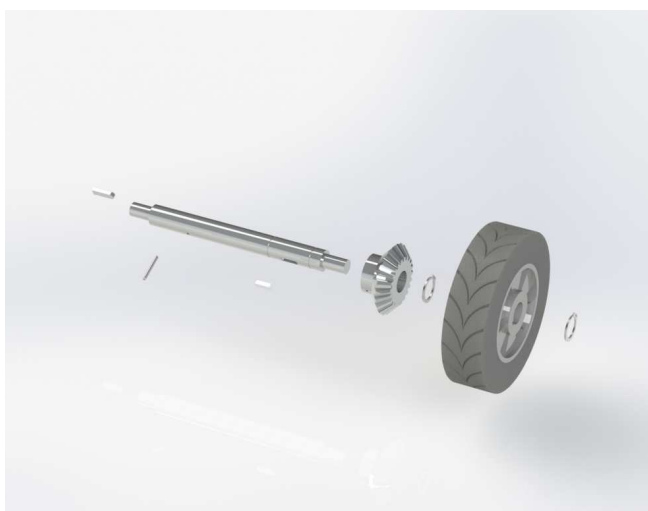


Figura 7 – Assieme albero

### 1.3.3 Sistema di sostegno per ruote dentate

Particolarità del Synchrodrive è quella di mantenere il telaio sempre nella stessa posizione, nonostante il sistema stia compiendo una curva. La soluzione adottata per permettere tale funzione è caratterizzata dall' utilizzo di due cuscinetti assiali, uno posto superiormente alla ruota dentata, l' altro inferiormente. Il supporto per i cuscinetti e per la ruota dentata, sono stati concepiti ad hoc: la ralla del cuscinetto inferiore viene incassata nel supporto, in modo da fissarla e centrare il dispositivo.



Figura 8 – Sezione supporto ruota dentata e cuscinetti

#### 1.3.4 Profilati

Per la struttura portante del telaio, sono stati utilizzati i profilati Bosch Rexroth da  $30 \times 30 \text{ mm}$  tra loro collegati per mezzo di appositi connettori forniti anch'essi dalla stessa azienda.

Grazie alla versatilità e alla semplicità di montaggio, l'utilizzo di questi profilati ha permesso un agevole progettazione della struttura portante senza compromettere il peso complessivo del robot, essendo costruiti in lega di alluminio.



Figura 9 – Profilato Bosch Rexroth  $30 \times 30 \text{ mm}$

#### 1.3.5 Carter

Data la geometria del device non è stato possibile modellare un carter di forma esteticamente elegante, ma data l'applicazione si è optato per una geometria quanto più semplice possibile. È in pvc per non gravare sulla massa complessiva e per l'aggiunta di alcuni particolari estetici.

La funzione principale di questo componente, è quella di coprire le ruote dentate che, essendo organi in movimento, potrebbero provocare situazioni di pericolo.



Figura 10 - Carter

#### 1.3.6 Motori

Il motore scelto per la sterzata è uno *Stepper Motor*, ideale per la trasmissione di momenti generanti rotazioni ad alta precisione. Si collega, per mezzo di un albero motore, direttamente alla ruota dentata centrale; il momento viene trasmesso tramite una linguetta incorporata sull'albero, che si accoppierà con una cava appositamente creata sul mozzo.

Il motore utilizzato per trasmettere il moto dell'avanzamento è elettrico DC brushless. Il vantaggio riguarda la vita attesa del motore, dato che le spazzole sono il "punto debole" di un motore elettrico. L'assenza di spazzole elimina anche la principale fonte di rumore elettromagnetico presente negli altri motori elettrici. L'ingombro è limitato rispetto alla potenza che possono erogare e soprattutto rispetto alla coppia che questi motori riescono ad erogare. In termini di efficienza, i motori brushless lavorano sempre in condizioni di rendimento ottimali.



Figura 11 – Motore passo-passo



Figura 12 – Motore brushless



## 1.4 Dimensionamento Motore Passo-Passo

È possibile ottenere il valore del momento motore per permettere la sterzata, dalla seguente relazione:

$$M_m - 4 \cdot M_c = I_z \cdot \alpha$$

Dove  $M_m$  è proprio il momento motore,  $M_c$  è il momento resistente agente sulla singola ruota,  $I_z$  è il momento d'inerzia totale e  $\alpha$  è l'accelerazione angolare.

Si valuti innanzitutto il momento d'inerzia, dovuto, nel SynchroDrive, alla somma dei momenti d'inerzia di tutte le ruote dentate costituenti il sistema di sterzo:

$$I_z = 4 \cdot I_{\text{ruote laterali}} + I_{\text{ruota centrale}} = 4 \cdot 0.41 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 0.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 1.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Occorre ora definire il momento resistente agente su ogni singola ruota. Essendo il sistema esaminato, sterzante "a secco", cioè quando gli pneumatici ruotano con velocità di avanzamento nulla, la coppia di sterzo richiesta è massima. Per valutare questo momento è possibile utilizzare la formula empirica di *Freudenstein*:

$$|M_c| \cong \frac{3}{8} \cdot f \cdot F_z \left( \omega + \frac{2}{3} \cdot l \right)$$

Dove " $\omega$ " ed " $l$ " sono le dimensioni dell'impronta di contatto, supposta rettangolare e costante; " $f$ " è il coefficiente d'attrito,  $F_z$  è la forza resistente che agisce su una singola ruota.

Ipotizzando, quindi, un'impronta di dimensioni  $\omega = 5\text{cm}$  ed  $l = 2\text{cm}$  e un coefficiente d'attrito  $f = 0.7$  sapendo che la forza resistente del robot è  $F_{\text{tot}} = 1117.84\text{N}$ , possiamo determinare il valore di  $M_c$ :

$$|M_c| \cong \frac{3}{8} \cdot f \cdot F_z \left( \omega + \frac{2}{3} \cdot l \right) \cong \frac{3}{8} \cdot 0.7 \cdot \frac{1117.84\text{N}}{4} \cdot \left( 0.05\text{m} \cdot \frac{2}{3} \cdot 0.02\text{m} \right) = 4.64 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Per cui, ipotizzando un'accelerazione angolare  $\alpha = 0.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ , il momento motore sarà

$$M_m = 4 \cdot M_c + I_z \cdot \alpha = 4 \cdot 4.64\text{N} \cdot \text{m} + 1.71\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 0.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 19.43 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Il motore scelto per il robot è capace di generare un momento di  $21 \text{ N} \cdot \text{m}$ , in grado quindi di vincere le forze resistenti.

## 1.5 Distinta base

ARTICOLO	Materiale	Quantità
Pneumatico	Gomma	4
Cerchione	Lega di alluminio	4
Ruota dentata conica	Acciaio inossidabile al cromo	8
Chiavetta bloccaggio ruota conica 2X24 mm	Acciaio inossidabile	8
Albero ruota	Acciaio inossidabile al cromo	4
Anello elastico bloccaggio ruota	Acciaio al carbonio per molle	8
Spina bloccaggio ruota conica	Acciaio inossidabile	8
Linguetta bloccaggio cerchione	Acciaio inossidabile	4
Cuscinetto albero-ruota	Acciaio inossidabile	8
Piastra per cuscinetto	Alluminio 7075-T6	8
Piastra fissaggio su ingranaggio	Alluminio 7075-T6	8
Profilato BoschRexroth 30X60 mm L=200 mm	Alluminio	8

Vite M6 X 14	Acciaio al carbonio	16
Vite M6 X 16	Acciaio al carbonio	16
Vite M6 X 12	Acciaio al carbonio	16
Vite M6 X 30	Acciaio al carbonio	68
Connettori a "L"	Alluminio	16
Vite M8 X 45	Acciaio al carbonio	8
Bullone M6	Acciaio al carbonio	48
Bullone M8	Acciaio al carbonio	8
Piastra supporto cuscinetto	Alluminio	4
Cuscinetto obliquo autobloccante	Acciaio inossidabile	4
Supporto cuscinetto assiale	Acciaio inossidabile al cromo	4
Cuscinetto assiale R=30mm	Acciaio inossidabile	8
Ruota dentata R=190mm	Acciaio inossidabile al cromo	4
Albero verticale trasmissione avanzamento	Acciaio inossidabile al cromo	4
Linguetta 10X10 mm	Acciaio inossidabile	4
Puleggia D=80mm	Alluminio	4
Cuscinetto radiale	Acciaio inossidabile	4
Cinghia a doppia dentatura	Gomma per cinghie	1
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=65mm	Alluminio	4
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=680 mm	Alluminio	14
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=204 mm	Alluminio	4
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=250 mm	Alluminio	3
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=30 mm	Alluminio	4
Connettore a "L"	Alluminio	12
Connettore cubico triplo	Alluminio	12
Connettore cubico quadruplo	Alluminio	4
Piastra struttura	Alluminio	2
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=740mm	Alluminio	2
Profilato BoschRexroth 30X30 mm L=48 mm	Alluminio	4
Giunzione piastra	Alluminio	4
Connettore a T 23mm	Alluminio	44
Connettore a T 14mm	Alluminio	4
Hexnut	Alluminio	48
Piastra batteria	Alluminio	1
Batteria	Multi materiale	1
Piastra aggancio batteria	Alluminio	1
Motore elettrico avanzamento	Multi materiale	1
Motore passo-passo	Multi materiale	1
Piastra motore	Alluminio	1
Piastra supporto ruota dentata centrale	Alluminio	1
Cuscinetto assiale R=76.5mm	Acciaio inossidabile	1
Carter	PVC	1
Nastri fissaggio computer	Nylon	2
Spray Gun	Multi materiale	1
Pannello solare	Multi materiale	1
Piastra fissaggio Spray Gun	Alluminio	1



## 2. Controllo

### 2.1 Introduzione al controllo

Con i termini “controllo” e “regolazione” s’intende, in generale, l’idea di intervenire su un dato sistema per ottenere le caratteristiche di comportamento desiderato rispetto ad un dato obiettivo.

Per controllare un sistema meccanico, il primo passo da fare è quello di creare un modello matematico capace di simulare il comportamento reale del sistema meccanico stesso. Questi modelli possono essere ad uno o più gradi di libertà, calcolabili attraverso la Formula di Gruebler:

$$L = 3(m - 1) - 2C_1 - C_2$$

dove  $m$  è il numero di membri che costituiscono il meccanismo  $C_1$  e  $C_2$  sono i numeri delle coppie cinematiche ivi presenti, che permettono rispettivamente uno e due gradi di libertà (eliminando dal piano uno o due gradi di libertà). Quindi se il sistema in esame fosse costituito da un solo corpo, questo avrebbe 6 gradi di libertà nello spazio, 3 se il moto fosse nel piano.

Questo modello deve essere capace di rappresentare i comportamenti del sistema meccanico in funzione dei comandi importati e di definire quali legami esistono tra le azioni in ingresso e il risultato del moto della macchina (o sistema meccanico) in uscita.

#### ***Cosa significa controllare un sistema?***

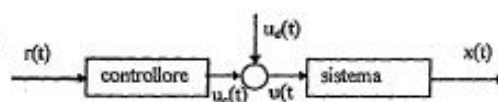
Controllare un sistema meccanico vuol dire fare in modo che il sistema non abbia moti indesiderati come variazioni o instabilità; per evitare questi moti si deve agire su parametri del sistema quali dimensioni, masse o smorzamenti.

Gli elementi fondamentali di un sistema di controllo sono:

- Generatore di un segnale di riferimento;
- Misuratore della grandezza regolata;
- Generatore di un segnale di retroazione;
- Dispositivo di confronto che fornisce l’errore;
- Organo di attuazione.

È così che s’individua da subito un’importante suddivisione tra due diversi tipi d’intervento di regolazione o controllo:

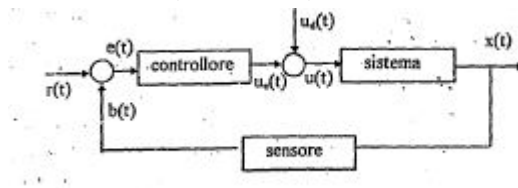
#### **2.1.1 Sistemi di controllo in anello aperto (Feed-Forward)**



In tale schema l’ingresso di riferimento che presenta l’obiettivo desiderato è passato al controllore che, in funzione di esso, definisce una forza di controllo. Tale forza si combina con un’altra di disturbo per dare la forza totale  $u(t)$  che agisce sul sistema. La risposta del sistema della forza complessiva  $u(t)$  è la grandezza  $x(t)$  che assume il ruolo di variabile controllata. La regolazione in anello aperto implica che bisogna

conoscere con accuratezza la dinamica del sistema o attraverso un modello matematico oppure attraverso misure sperimentali in modo da conoscere con precisione i legami tra uscita e ingresso. In un tale sistema, la forza di controllo non dipende dallo stato effettivo del sistema, ma da quello stimato, pertanto, se cause esterne e incertezze sulla conoscenza del modello fanno sì che lo stato del sistema devii dal sistema desiderato, non ci sarà alcun modo di correggere tale comportamento. Un sistema ad anello aperto può essere paragonato ad un dispositivo di comando a distanza in cui ci si limita a trasmettere il comando, senza verificare che esso sia stato eseguito.

### 2.1.2 Sistemi di controllo in anello chiuso (Feed-Back)



Un sistema in anello chiuso, più flessibile del primo, può rendere stabile un sistema che per sé non lo è per niente.

Come si vede esso contiene un elemento addizionale, ossia un sensore o trasduttore.

Il trasduttore misura la variabile di uscita  $x(t)$  ed invia la corrispondente informazione al controllore. Il controllore riceve il segnale di riferimento (o lo genera) ed elabora un errore, generando il segnale di controllo il quale viene inviato all'attuatore che ha lo scopo di generare la forza di controllo. Un tale sistema prende il nome di "Sistema di controllo retroazionato" o "In anello chiuso". Tale retroazione può avvenire in modo automatico o manuale. Per rendere l'idea si pensi al caso di un'autovettura in cui l'autista, in base alla lettura del tachimetro, che fornisce il valore della grandezza controllata (la velocità), decide se aumentare o diminuire la pressione sull'acceleratore, in modo da riportare la velocità al valore desiderato. L'anello di controllo è, in questo caso, chiuso dall'autista che legge il valore della velocità, la confronta con il valore desiderato e si regola di conseguenza agendo sull'accelerazione o sul freno. L'autista ha la funzione del controllore. Il controllo in state-feedback è molto utile nel caso in cui il sistema dinamico tenda facilmente a destabilizzarsi, oppure sia soggetto a vibrazioni e comportamenti indesiderati non facilmente prevedibili o troppo complessi da studiare e rappresentare in una legge di comportamento dinamico.

Obiettivo di ogni sistema di controllo è che la variabile controllata si discosti il meno possibile dall'andamento desiderato; da questo punto di vista, la situazione ideale si ha quando il sistema realizza una perfetta coincidenza tra il valore desiderato della variabile controllata e il valore effettivo  $x(t)$ . Considerando, però, i fenomeni dinamici che possono aver luogo e la presenza di disturbi nel modello, che rendono incerta l'attuazione del controllo stesso, è chiaro che tale risultato sia irraggiungibile. Occorrerà quindi richiedere più ragionevolmente, che l'errore risulti "piccolo" in tutte le condizioni di funzionamento prevedibili. Nel funzionamento del sistema, della macchina o dell'impianto controllato si debbono considerare, infatti, anche le azioni di disturbo. È precisamente la presenza dei disturbi che rende necessaria la presenza di un sistema di controllo, avendo lo scopo di mantenere la grandezza regolata quanto il più possibile vicino al valore desiderato.

Più precisamente le caratteristiche fondamentali che un sistema di controllo deve possedere sono le seguenti:

Requisiti dinamici:

- Il requisito fondamentale di ogni sistema di controllo è l'asintotica stabilità; il problema, infatti, consiste nel fatto che il controllo, applicando un'azione funzione dello stato del sistema (assimilabile ad una forza di campo), ne modifica la stabilità, richiedendo una verifica della stessa;
- Velocità di risposta adeguata: di fronte ad una brusca variazione della variabile controllata, si ritiene che la risposta del sistema tenda ad adeguarsi al nuovo valore dell'ingresso il più rapidamente possibile. Nel caso in cui l'andamento risulti instabile, si vuole che le oscillazioni siano contenute.

Requisiti statici: qualora un sistema di controllo debba operare essenzialmente in condizione di regime, ossia la durata dei transitori sia piccola rispetto alla durata del regime, si comprende l'importanza di richiedere al sistema di controllo che, una volta esauriti i transitori, l'errore  $e(t) = x(t) - r(t)$  (errore a transitorio esaurito) si mantenga entro i limiti ritenuti accettabili.

## 2.2 Modello Simulink

Appena ultimata la realizzazione del nostro robot tramite SolidWorks, è stata focalizzata l'attenzione sul controllo dello stesso.

Il primo passo è stato importare nell'ambiente di lavoro di **Matlab Simulink** mediante la funzione *mech\_import* ('nome\_file.xml ') una copia opportunamente alleggerita del nostro sistema grazie a **SimMechanics**, ottenendo un sistema schematizzato a blocchi che tiene conto di tutte le informazioni geometriche, fisiche e matematiche dei corpi, nonché dei vincoli imposti tramite gli accoppiamenti dell'assieme finale.

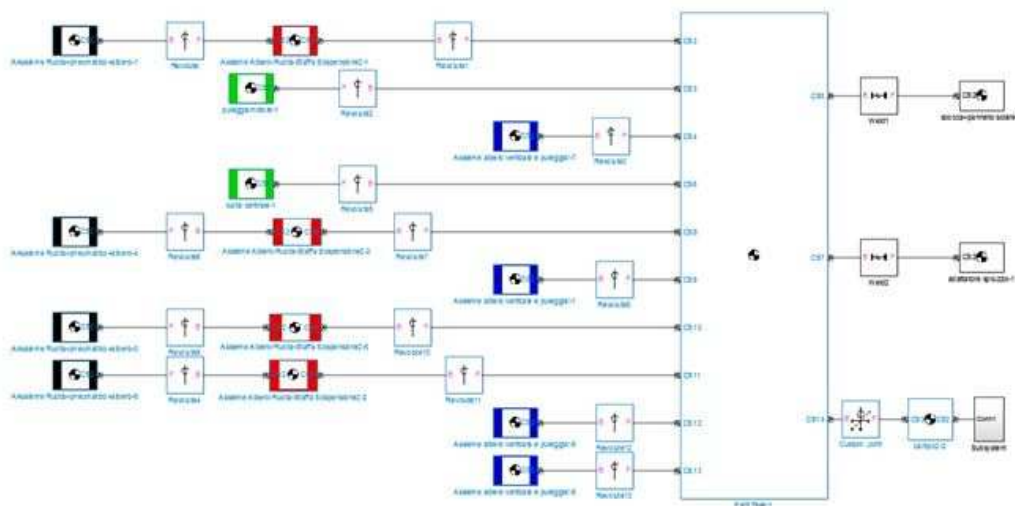


Figura 13 – Modello di prima importazione.

Sono stati evidenziati, usando colori diversi, i vari componenti che costituiscono il sistema.

- In verde gli organi che trasmettono il movimento: Puleggia motrice e Ruota dentata centrale;
- In rosso le ruote dentate che trasmettono il moto di sterzata;
- In blu l'assieme di pulegge mosse e alberi verticali che trasmettono il moto di avanzamento;
- In nero gli alberi orizzontali sui quali sono alloggiati gli pneumatici.

Il passo successivo, è stato implementare questo sistema basilare mediante l'utilizzo di opportuni blocchetti, in modo da permettere il funzionamento fisico da noi desiderato; in particolare, abbiamo realizzato i vari accoppiamenti tra ruote dentate che caratterizzano il nostro robot mediante il blocchetto *Velocity Driver*.



Figura 14 - Struttura ottimizzata del modello Simulink.

Per comodità e pulizia del lavoro abbiamo racchiuso il sistema di trazione e il sistema di sterzo in due *Subsystem*. Quindi nel subsystem *Sistema di sterzo* è stata racchiusa la ruota dentata centrale collegata, mediante quattro *Velocity Driver*, ad altrettante ruote dentate che a loro volta sono collegate al telaio mediante un *Revolute*. Con collegamenti del tutto analoghi, nel sistema di avanzamento, sono state racchiuse la puleggia motrice e le quattro pulegge mosse.

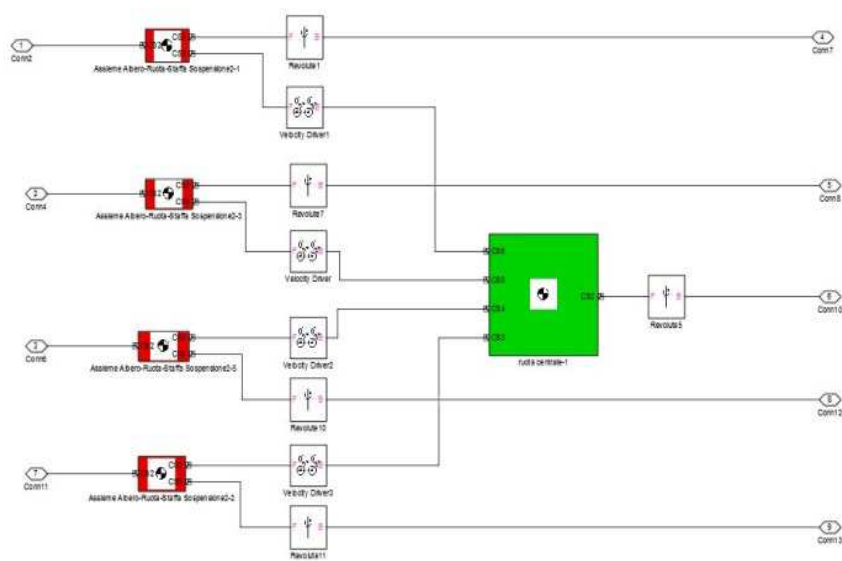


Figura 15 - Sistema di sterzo

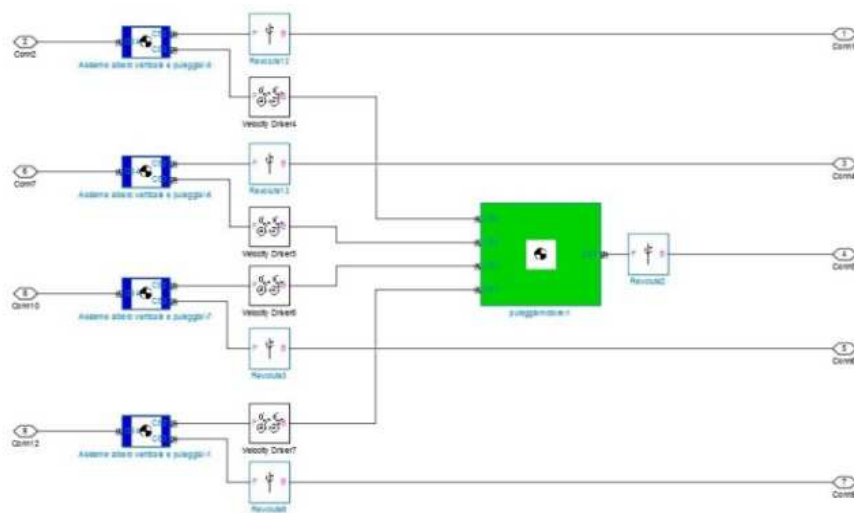


Figura 16 - Sistema di avanzamento.

In seguito alle giuste migliorie apportate, si è potuto lanciare la simulazione grafica al fine di verificare che la struttura finale del robot e del campo da gioco soddisfacessero i requisiti prefissati necessari per il prosieguo della simulazione. Si è potuto, inoltre, verificare il giusto posizionamento iniziale del robot sul campo da gioco, necessario per una simulazione più realistica.

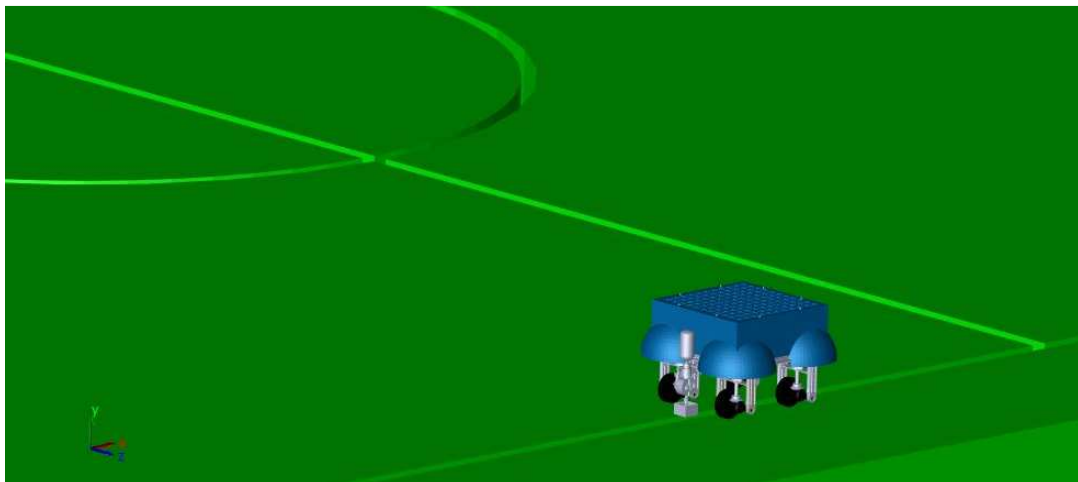


Figura 17 - Aspetto del robot nella finestra di simulazione.

## 2.3 Definizione traiettoria

La traiettoria richiesta si compone di un primo tratto rettilineo lungo l'asse x di metri 3, di un tratto rettilineo lungo l'asse z di metri 6 in seguito ad una sterzata delle ruote di  $90^\circ$  e di una successiva semicirconferenza di raggio 3 metri preceduta da un'ulteriore sterzata di  $90^\circ$ , immaginando di riprodurre le linee di una porzione del campo da gioco.

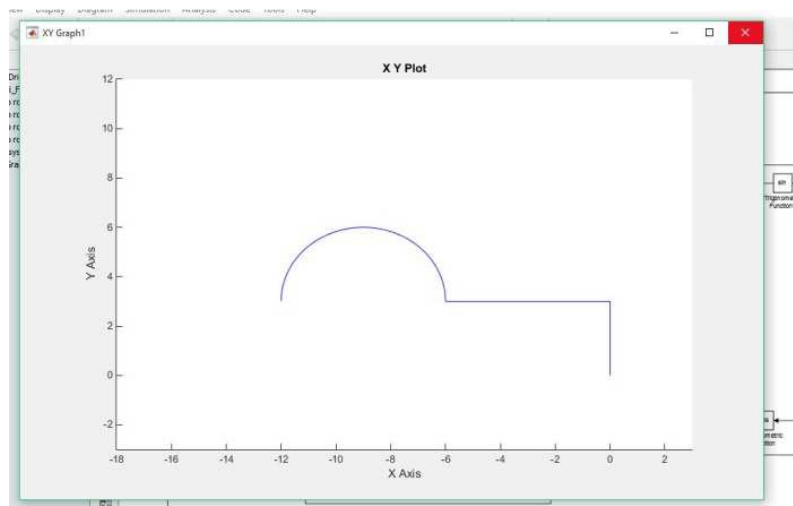


Figura 18 - Traiettoria

La suddetta traiettoria è stata implementata nell'ambiente Simulink con l'ausilio di blocchetti matematici.

Nello specifico, è stato definito il grafico delle velocità mediante il blocchetto "Signal Builder" e successivamente integrato e derivato lo stesso per ottenere rispettivamente la posizione e l'accelerazione. Le tre aliquote sono state, mediante un *Mux*, riunite in un unico vettore. In particolare per quanto concerne la semicirconferenza, la velocità è stata integrata per ottenere la posizione *theta*, che moltiplicata per il raggio della circonferenza e per il seno e il coseno ci ha fornito le componenti lungo i due assi. A tale traiettoria va poi aggiunto il sistema di sterzaggio modellato in modo del tutto analogo.

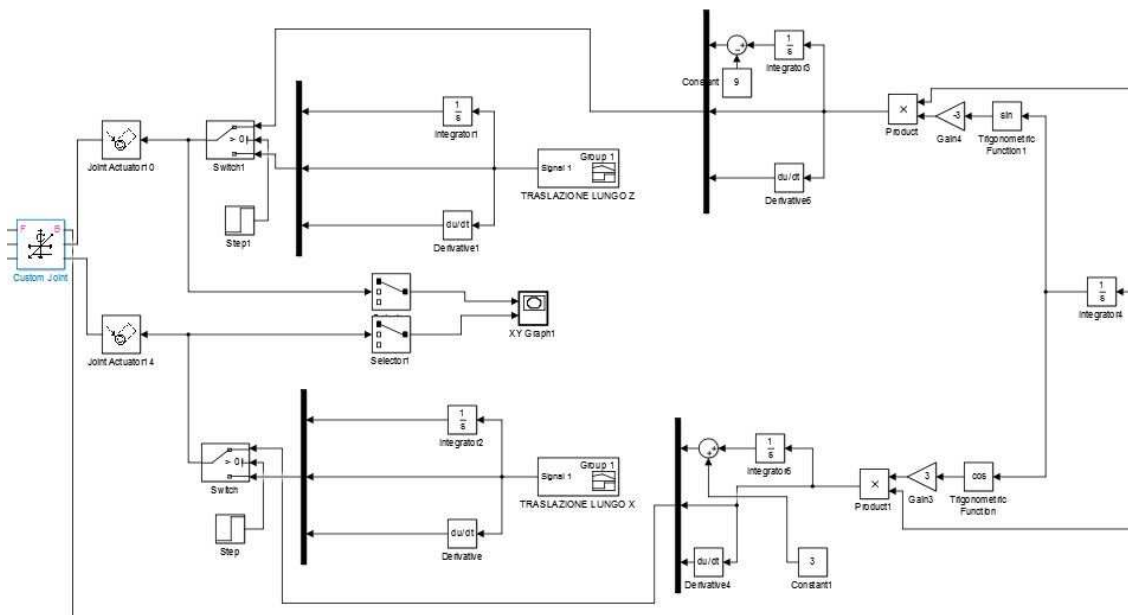


Figura 19 - Implementazione della traiettoria.

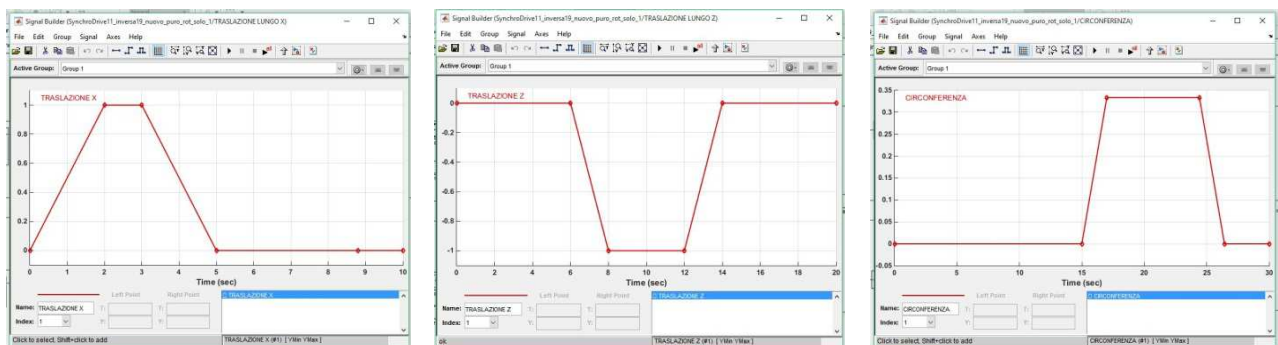


Figura 20 - Signal Builder.

Come si evince dai grafici si è ipotizzata una velocità massima del robot di  $1 \frac{m}{s}$  e un'accelerazione massima di  $0,5 \frac{m}{s^2}$ , riuscendo a completare la traiettoria prefissata in un tempo di circa 27 secondi.

Purtroppo, tale traiettoria si scontra con le caratteristiche strutturali del robot. In particolare la semicirconferenza risulta incompatibile con la sterzata sincrona delle quattro ruote dentate, in quanto impedisce la tangenza contemporanea alla curva dei quattro pneumatici. Si è dovuto quindi eliminare il tratto finale della traiettoria e continuare con il controllo.



## 2.4 Dinamica inversa

Partendo dal sistema precedentemente importato, si è potuta modellare la dinamica inversa che, fornendo in input le leggi orarie nonché la velocità e l'accelerazione, ci dà in output le forze e i momenti da applicare al sistema per ottenere la traiettoria desiderata.

In particolare fornendo in ingresso le leggi orarie al telaio per la traslazione e alla ruota dentata centrale per lo sterzo, si vuole ottenere il momento da applicare alla puleggia motrice affinché il robot esegua la traiettoria definita.

Prima di iniziare lo studio della dinamica inversa, vista l'incompatibilità dei blocchetti *Velocity Driver*, questi sono stati sostituiti con sensori ed attuatori (*Joint sensor e Joint Actuator*) in modo da mantenere invariati gli accoppiamenti tra ingranaggi. Per garantire il giusto senso di rotazione sono stati, inoltre, utilizzati *Gain* con valore -1.

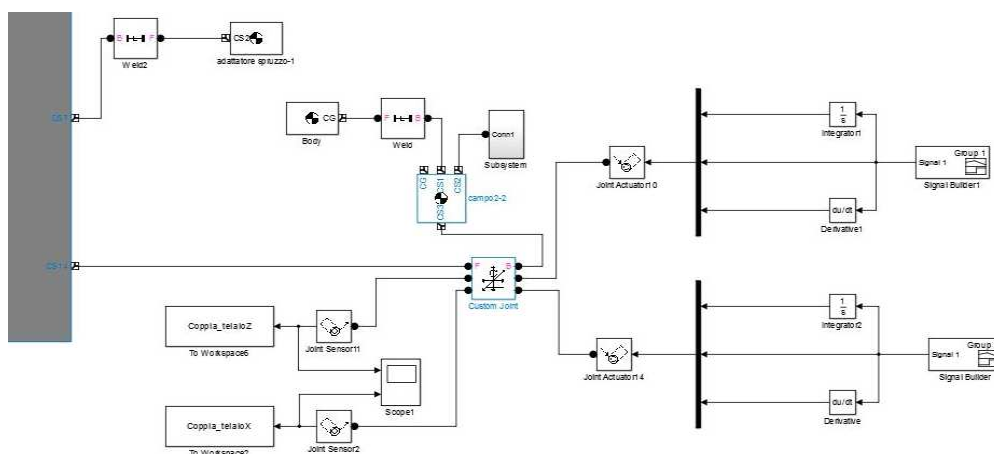


Figura 21 - Attuazione della traiettoria di traslazione.

Per la traslazione è stata fornita la legge del moto al *Custom Joint* tramite un *Joint actuator*. Sono stati poi salvati i risultati ottenuti, cioè le forze necessarie alla traslazione del telaio lungo i due assi, mediante il blocchetto *To Workspace* che consente di memorizzare il risultato nel workspace di matlab, per poter essere successivamente utilizzato.

Ovviamente le sole due forze necessarie alla traslazione del telaio sarebbero insufficienti al robot per seguire la traiettoria imposta, infatti, bisogna tener conto anche del momento necessario alla rotazione di tutti gli organi che consentono l'avanzamento, cioè il sistema cinghia-pulegge con relativi alberi verticali e gli pneumatici.

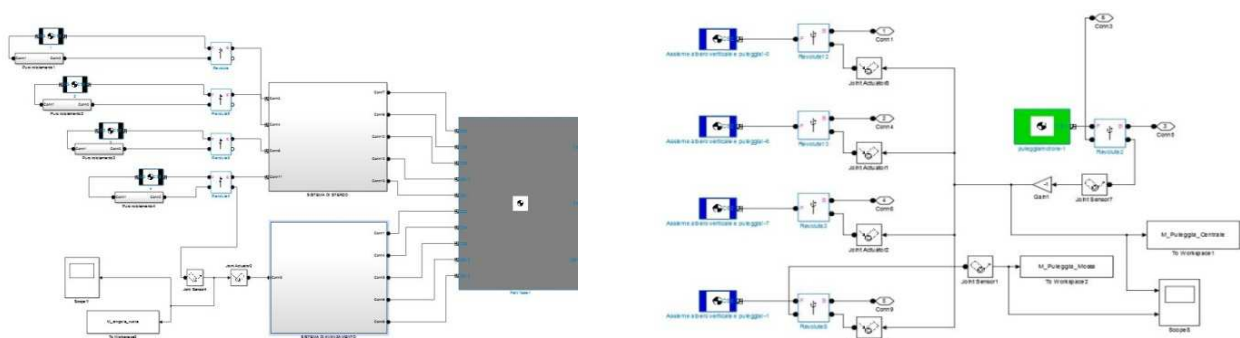


Figura 22 - 2Schematizzazione e salvataggio dei momenti.

Sono stati salvati quindi nel workspace di matlab anche altri tre momenti:

- il momento della puleggia motrice;
- il momento dell'assieme albero verticale-puleggia mossa;
- il momento dell'assieme albero orizzontale-pneumatico.

Non sono stati letti i momenti di tutte le pulegge mosse e di tutti gli pneumatici, in quanto, essendo tra di loro uguali, basta moltiplicare quello salvato per quattro.

Inoltre, per la dinamica inversa, è stato opportunamente realizzato un sistema capace di garantire il puro rotolamento tra gli pneumatici e il campo su cui poggia il robot, lungo entrambi gli assi. È stato quindi creato un *Subsystem*: Puro Rotolamento.

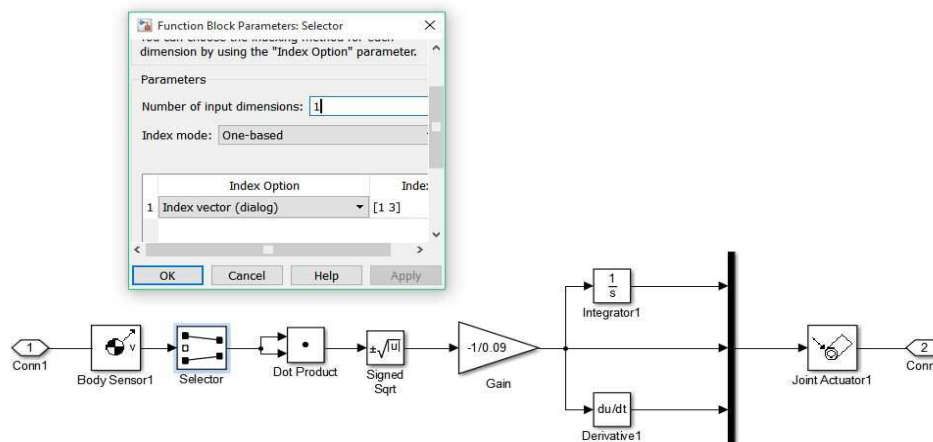


Figura 23 - Puro rotolamento.

Per quanto riguarda il sistema di sterzo, dopo aver fornito la legge di moto con relative velocità e accelerazioni come per l'avanzamento, sono stati salvati i momenti atti a garantire il movimento:

- Momento della ruota dentata centrale;
- Momento della ruota dentata mossa che andrà poi moltiplicato per quattro.

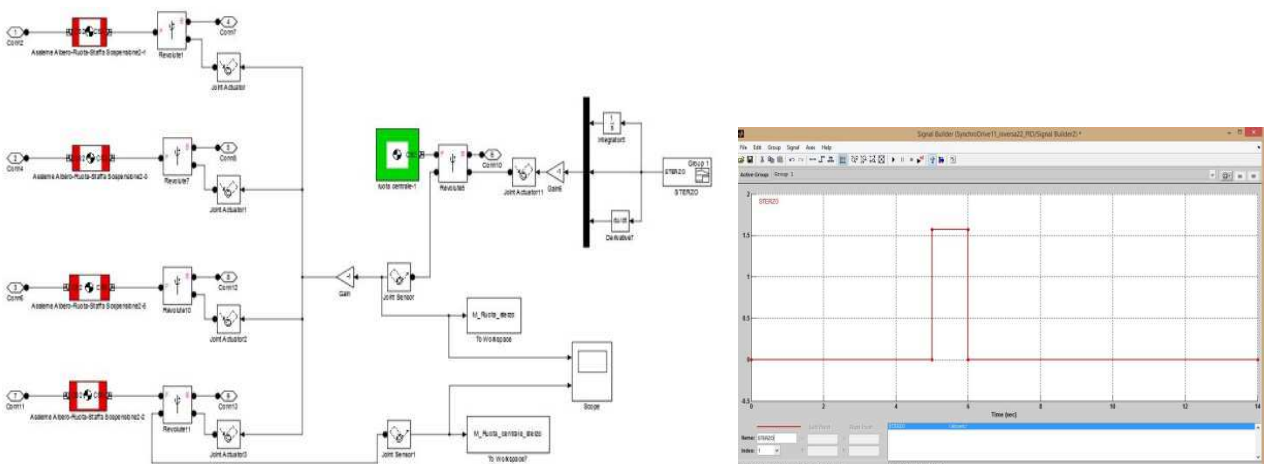


Figura 24 - Attuazione della traiettoria di sterzo.

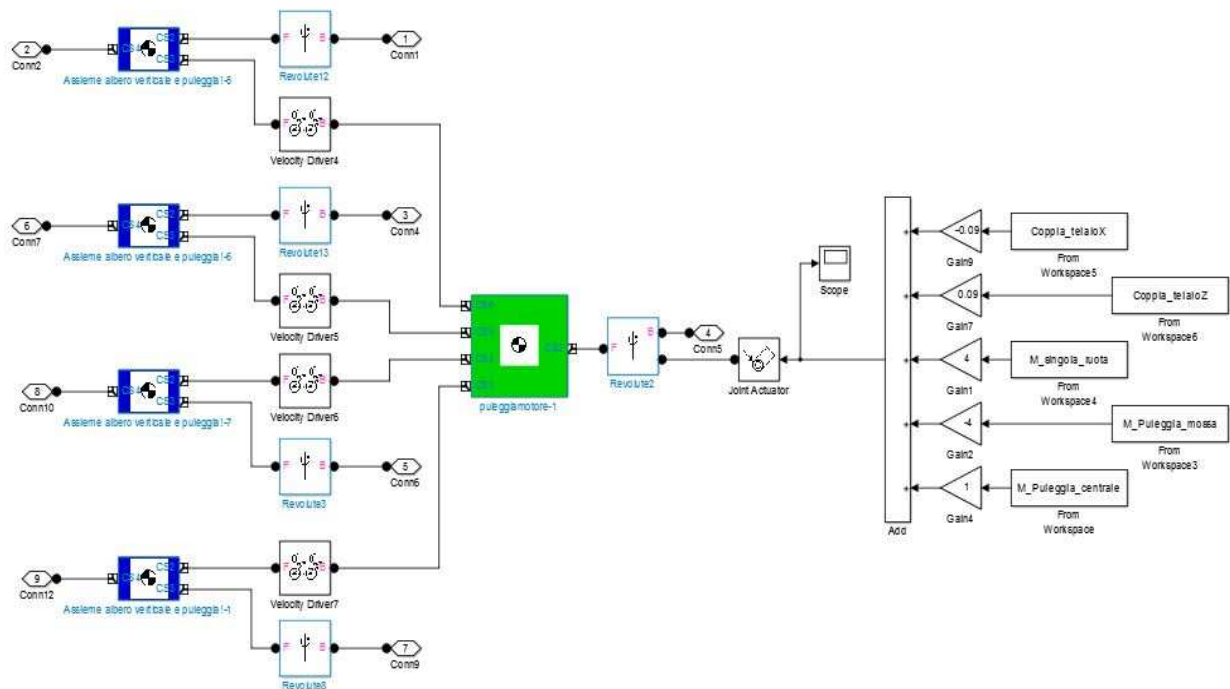
## 2.5 Dinamica diretta

Ultimata, con successo, la dinamica inversa, si è potuto passare alla modellazione della dinamica diretta che, fornendo in input i momenti prima ricavati, permette di ottenere la traiettoria desiderata.

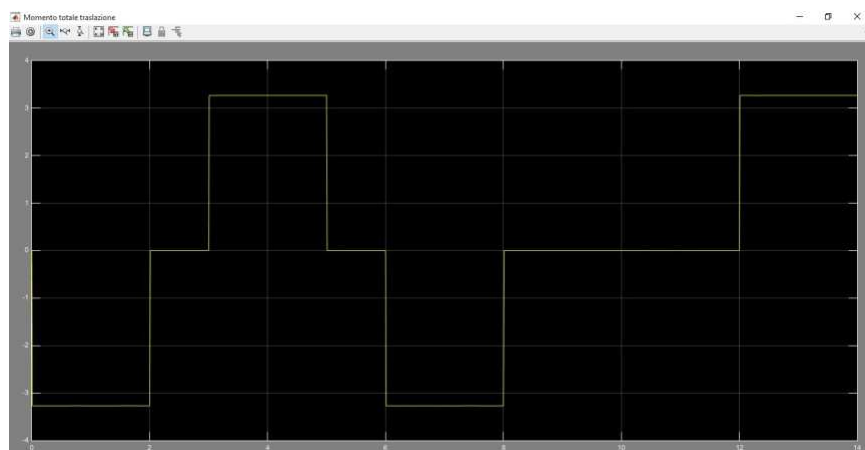
In dinamica diretta, sono state sommate tutte le aliquote dei momenti necessari alla traslazione e alla rotazione importati in Simulink mediante il blocchetto *From Workspace*.

In particolare, per l'avanzamento, sono stati sommati i momenti delle cinque pulegge e dei quattro pneumatici alle forze di traslazione del telaio, precedentemente moltiplicate per il raggio degli pneumatici in modo da ottenere il relativo momento. Tale somma, costituente il momento totale di traslazione, è stata successivamente attuata mediante un *Joint Actuator* al *Revolute* tra telaio e puleggia motrice.

In figura è riportato, oltre alla schematizzazione a blocchi, il grafico del momento totale di traslazione che presenta la caratteristica struttura ad onda quadra.



**Figura 25 - 3**Attuazione dei momenti per la traslazione



**Figura 26 – Scope Attuazione dei momenti per la traslazione**

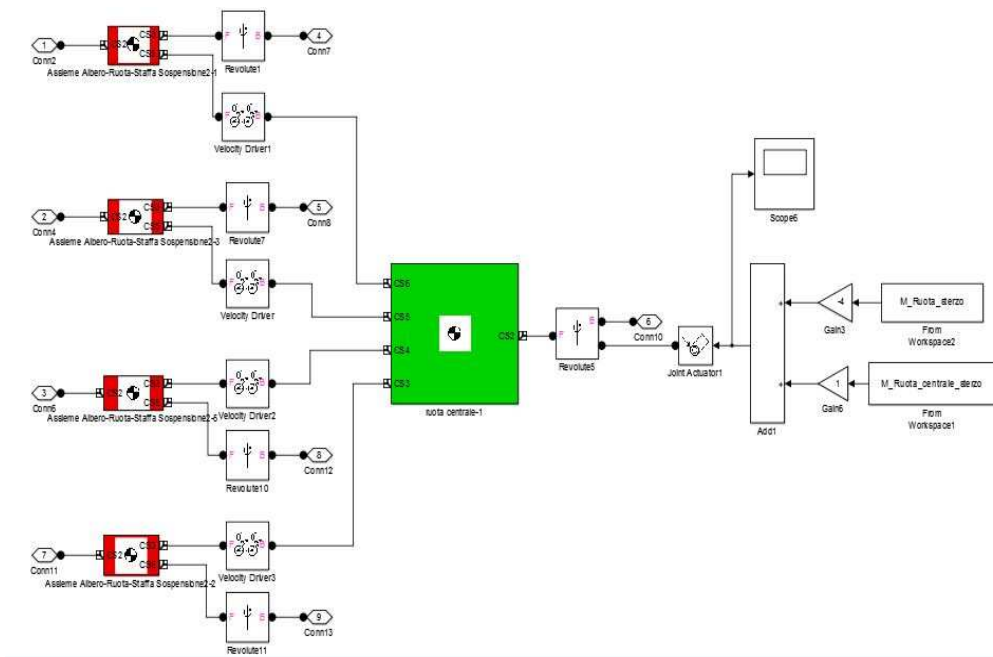


Figura 27 - Attuazione dei momenti per lo sterzo



Figura 28 - Scope Attuazione dei momenti per lo sterzo

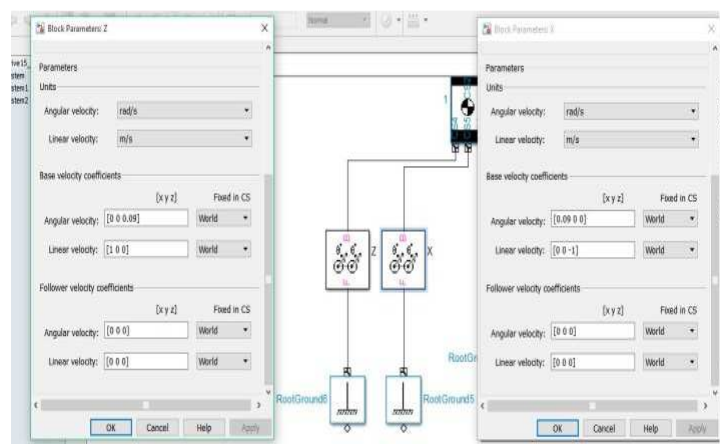
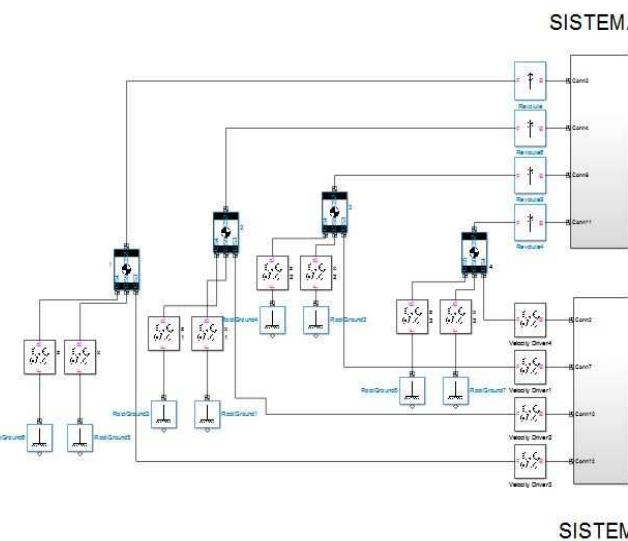


Figura 29 – Puro rotolamento con Velocity Driver.

Per lo sterzo si è operato in modo del tutto analogo. Si è quindi ottenuto il momento totale di sterzo sommando il momento della ruota dentata centrale e delle altre quattro ruote dentate che costituiscono il sistema. Tale momento è stato attuato alla ruota dentata centrale.

Inoltre, è stato necessario sostituire il sistema per il puro rotolamento, implementato per la dinamica inversa, in quanto risultava incompatibile con la dinamica diretta. Questa volta sono stati utilizzati due *Velocity Driver*, uno per l'asse x e l'altro per l'asse z, collegati tra l'albero orizzontale che alloggia lo pneumatico e un *Root Ground* contenente le coordinate del punto di contatto tra piano e ruota.

## 2.6 Dinamica diretta con perturbazione

Per perturbare il sistema è stata aggiunta una massa di 4 kg al telaio che corrisponde a circa il 20 % della massa totale. Abbiamo quindi analizzato due casi:

- Controllo in open-loop, imponendo in ingresso i momenti e le forze, calcolate senza massa aggiuntiva, al fine di verificare e misurare lo scostamento dalla traiettoria prefissata.
- Controllo in closed-loop, sviluppando un sistema PID sulla posizione capace di correggere l'errore creatosi.

### OPEN-LOOP

In questa fase è stata semplicemente ripetuta la simulazione in dinamica diretta aggiungendo una piccola massa al telaio del robot.

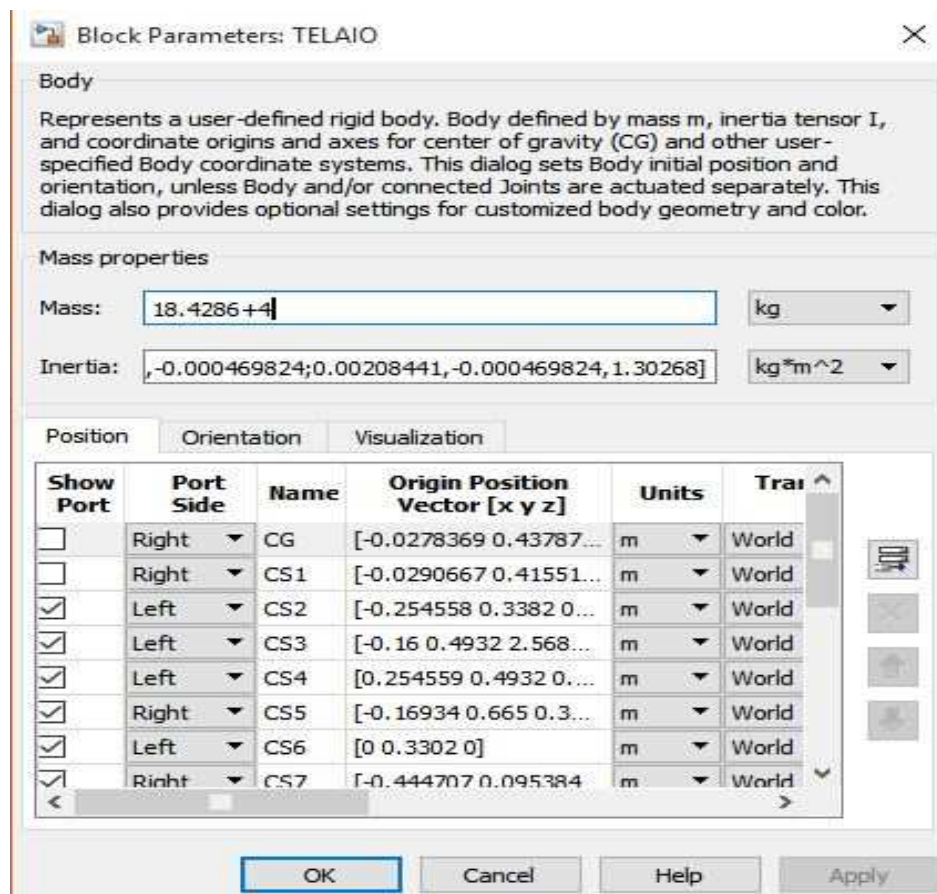


Figura 30 - Massa aggiuntiva.

Inoltre, sono stati misurati e visualizzati, per mezzo di uno scope, gli errori commessi sulla traiettoria. Tali errori sono stati ottenuti confrontando la posizione dello spruzzatore e la rotazione (*theta*) delle ruote dentate, con gli stessi dati misurati in dinamica inversa (*X\_Rif*, *Z\_Rif*, *Theta\_Rif*) e importati mediante un blocchetto *From Workspace*.

Di seguito sono riportati gli scope che mostrano i relativi errori

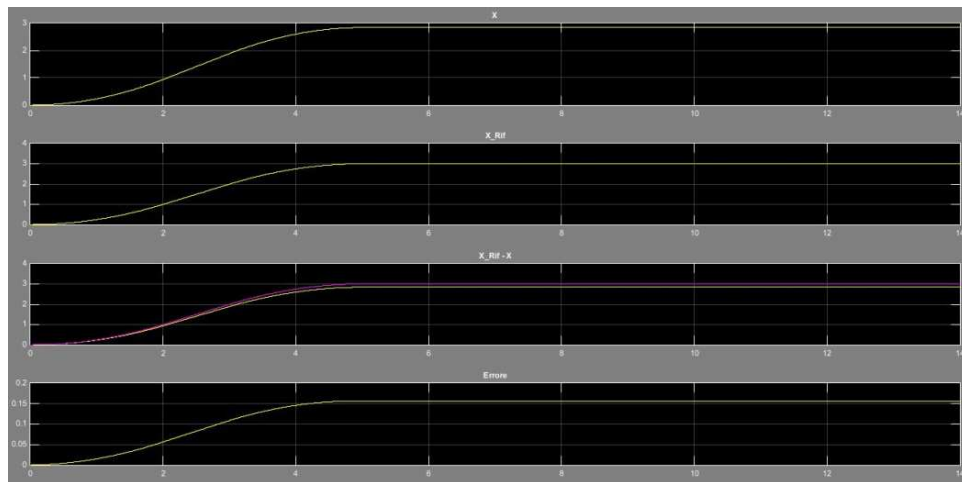


Figura 31 - Errore lungo l'asse x.

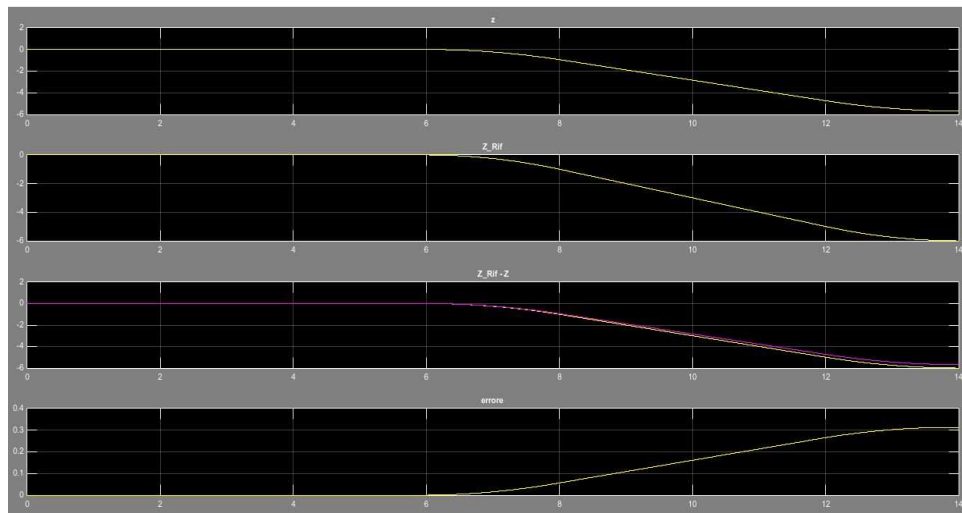


Figura 32 - Errore lungo l'asse z.

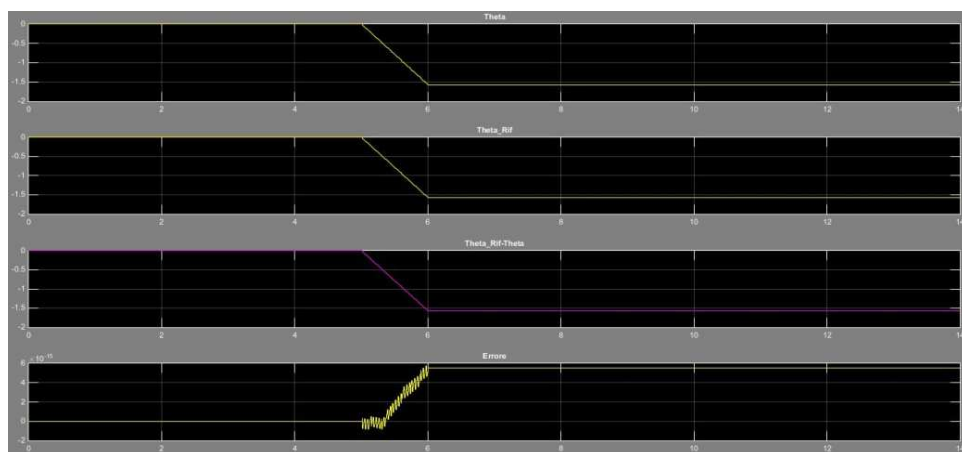


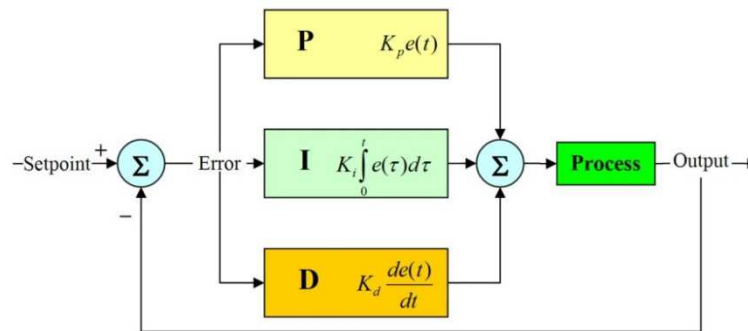
Figura 33 - Errore sterzo.



## 2.7 Controllo in closed-loop (PID)

Come si evince dal grafico, l'errore commesso sulla rotazione *Theta* è del tutto trascurabile grazie all'utilizzo di cuscinetti volventi interposti tra telaio e ruote dentate che assicurano massima riduzione di attrito nel moto di sterzata. In questo paragrafo, quindi, concentreremo l'attenzione soltanto sulla correzione dell'errore lungo gli assi x e z.

Quindi si è deciso di applicare al sistema un controllo in closed-loop di tipo PID (proporzionale-integrativo-derivativo).



$$u = K_p e + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

$$u = u_p + u_i + u_d$$

Il controllore acquisisce in ingresso un valore da un processo e lo confronta con un valore di riferimento. La differenza, il cosiddetto errore, è quindi usata per determinare il valore della variabile di uscita, che è quella manipolabile dell'intero processo.

Il PID regola l'uscita in base a:

- Il valore del segnale di errore (azione proporzionale);
- I valori passati del segnale di errore (azione integrativa);
- Quanto velocemente varia il segnale di errore (azione derivativa).

Si è quindi passati alla realizzazione dello schema a blocchi di seguito riportata.

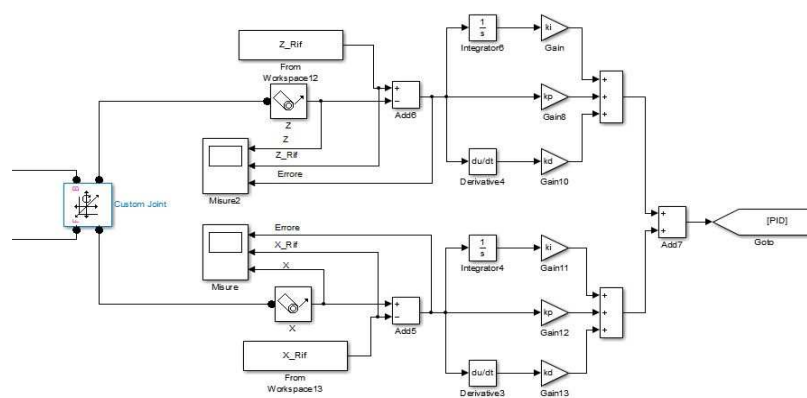


Figura 34 - Schematizzazione sistema PID.

All'ingresso del PID bisogna fornire l'errore, ossia la differenza tra grandezza misurata e grandezza di riferimento, precedentemente misurata. L'errore viene poi diramato e si eseguono tre operazioni:

- Viene moltiplicato per una costante  $K_p$  (proporzionale)
- Viene integrato e poi moltiplicato per una costante  $K_i$  (integrativo)
- Viene derivato e successivamente moltiplicato per una costante  $K_d$  (derivativo)

Le tre aliquote sono poi sommate e attuate con i rispettivi momenti e forze.

I valori delle tre costanti sono stati scelti per iterazione, finché i risultati ottenuti non sono risultati soddisfacenti.

Nello specifico:

$$K_p = 40$$

$$K_i = 5$$

$$K_d = 10$$

Di seguito sono riportati, mediante scope, i grafici che illustrano i risultati ottenuti.

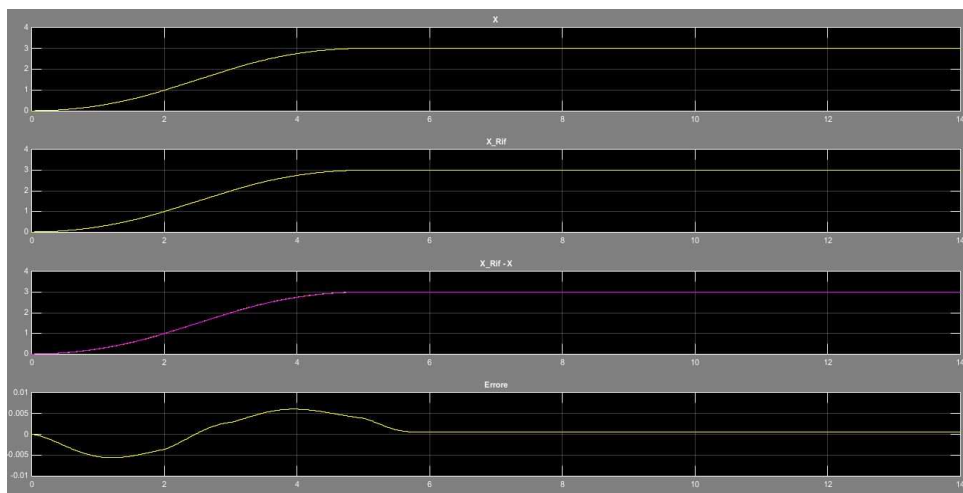


Figura 35 - Annullamento errore lungo l'asse x.

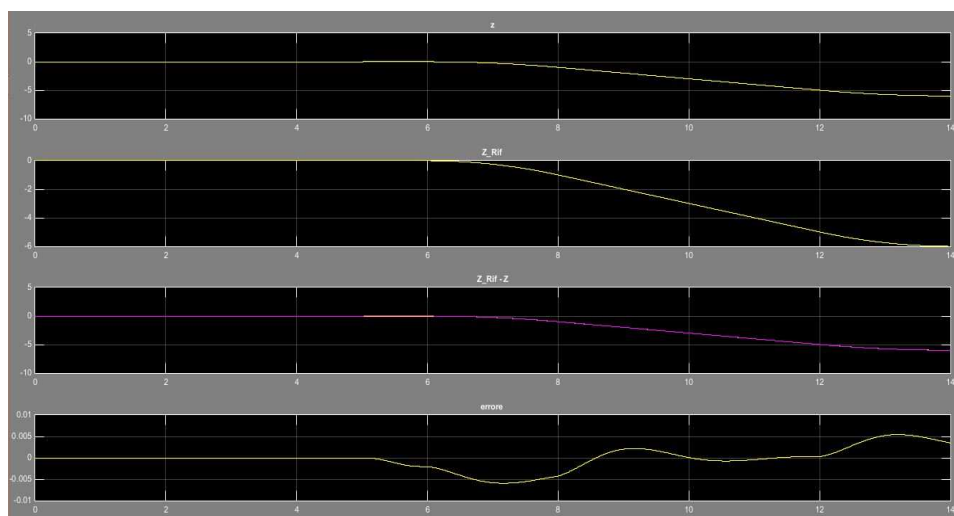


Figura 36 - Annullamento errore lungo l'asse z.

Come si evince, si è arrivati ad ottenere una considerevole riduzione dell'errore iniziale fino a poterlo ritenere trascurabile rispetto alla traiettoria imposta.

## 2.8 Conclusioni

Finito il lavoro, si è voluto trovare possibili soluzioni che permettessero al robot di tracciare linee curve. Sono state elaborate due possibili soluzioni, una di tipo strutturale ed un'altra di tipo dinamico:

- Inserimento di una tramoggia mobile in grado di eseguire tratti di circonferenza. In questo modo al robot basterebbe avvicinarsi alla curva compiendo una poligonale. Il gap sarà poi colmato dal movimento della tramoggia stessa.
- Controllo dinamico della traiettoria mediante un sistema in closed-loop del tutto analogo al sistema PID visto in precedenza. In questo modo si andrebbe ad intervenire sulla traslazione e sulla sterzata, definendo una forza variabile alle ruote capace di correggere punto per punto la traiettoria. Ovviamente si perderebbe il puro rotolamento.