

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÁ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in

Ingegneria Informatica

Tesi di Laurea

Algoritmi di stabilizzazione della camminata di robot umanoide

RELATORE: Prof. Emanuele Menegatti

LAUREANDO: Andrea Bortoluzzi

Padova, 09/03/2010

Anno Accademico 2009/2010

*Ai miei genitori Claudio e Luigina che mi hanno
sempre sostenuto durante questi anni
A mio fratello Fabio che mi sopporta sempre
con tanta pazienza*

Indice

1	Introduzione	11
1.1	Robotica Umanoide	11
1.2	Scopo della tesi	12
1.3	Struttura della tesi	15
2	Il Kondo	17
2.1	Descrizione	17
2.2	La scheda RCB-3HV	19
3	Giroscopio	21
3.1	Tipi di giroscopi	21
3.1.1	giroscopio meccanico	21
3.1.2	giroscopio ottico	22
3.1.3	giroscopio MEMS	25
3.2	Calibrazione del giroscopio	26
3.2.1	Bias traslazionale	26
3.2.2	Fattore di scala	27
3.2.3	Deriva dei giroscopi	27
3.2.4	Rumore termo-meccanico	28
3.3	KRG-3	28
4	Accelerometro	31
4.1	Tipi di Accelerometri	33
4.1.1	Accelerometro estensimetrico	33
4.1.2	Accelerometro piezoresistivo	34
4.1.3	Accelerometro LVDT	34

4.1.4	Accelerometro capacitivo	34
4.1.5	Accelerometro piezoelettrico	35
4.1.6	Accelerometro Laser	36
4.2	Calibrazione degli acellerometri	36
4.3	RAS-2	37
5	Calcolo dell'orientazione del robot	39
5.1	Descrizione dei sistemi di riferimento	39
5.1.1	Sistema di riferimento body	39
5.1.2	Sistema di riferimento globale	40
5.2	Gli angoli di Eulero	40
5.2.1	Rotazione attraverso gli angoli di Eulero	40
5.3	Le matrici dei cosini direttori	42
5.4	I quaternioni	44
5.5	Relazione tra gli angoli di Eulero e matrice dei cosini direttori	46
5.6	Algoritmo svlilupato	48
5.6.1	Teoria	49
5.6.2	Discretizzazione dell'algoritmo	50
5.6.3	Implementazione	51
5.6.4	Grafica del programma	54
5.7	Esperimenti	56
6	Locomozione Bipede	59
6.1	Introduzione	59
6.2	Passive walkers	60
6.3	Static walkers	63
6.4	Dynamic walkers	65
6.5	Purely dynamic walkers	68
7	Camminata Realizzata	71
7.1	Traiettoria delle gambe	71
7.2	Movimento delle braccia	73
7.3	Movimento del corpo	73

8	Stabilizzazione della camminata	75
8.1	Movimento base del bacino	76
8.1.1	Movimento laterale	76
8.1.2	Movimento longitudinale	77
8.2	Correzione della posizione	77
8.2.1	Calcolo dell'assetto del robot	77
8.2.2	Individuazione dell'instabilità	79
8.2.3	Aggiustamento dell'assetto	79
8.3	Risultati dei test	80
9	Conclusione e Sviluppi Futuri	83
	Bibliografia	85

Elenco delle figure

2.1	Kondo 1HV	17
2.2	Scheda RCB-3HV	19
2.3	Schema della scheda RCB-3HV	20
3.1	Effetto Sagnac	23
3.2	Ring Laser Gyro	24
3.3	Fibre Optic Gyro a) Schema di un FOG b) FOG	25
3.4	Schema funzionale MEMS Gyro	26
3.5	Effetto del bias	27
3.6	Fattore di Scala non nullo	28
3.7	KRG-3	29
4.1	Schema a blocchi di un accelerometro	32
4.2	Estensimetro elettrico a resistenza	33
4.3	Ponte di Wheatstone	34
4.4	Linear Variable Differential Trasformer	35
4.5	Schema cristallo piezoelettrico	36
4.6	RAS-2	37
4.7	Disposizione degli assi nell'RSA-2	37
5.1	Rotazione attorno all'asse z (rotazione 1)	41
5.2	Rotazione attorno all'asse y' (rotazione 2)	41
5.3	Rotazione attorno all'asse z'' (rotazione 3)	42
5.4	rappresintazione grafica del quaternioni a quattro parametri	45
5.5	La freccia indica la posizione dei giroscopi	52
5.6	Posizionamento giroscopi	53
5.7	Posizionamento degli assi	53

ELENCO DELLE FIGURE

5.8	Visualizzazione grafica degli angoli di Eulero	54
5.9	Storico dei dati	55
5.10	Dati dell'accelerometro	56
5.11	Dati del giroscopio	57
5.12	Confronto tra accelerometri e giroscopi	57
6.1	Wagon Wheel	60
6.2	Rimless Wheel	60
6.3	Cambio del centro di rotazione nella rimless wheel	61
6.4	Cambio del centro di rotazione nella rimless wheel	62
6.5	Passive walker McGeer	64
6.6	Passive walker Collins	64
6.7	Diverse posizioni del baricentro	65
6.8	Calcolo dello ZMP	66
6.9	ZMP nel caso del pendolo inverso	68
6.10	Configurazione minima per un robot bipede	69
7.1	Movimento Piedi	72
7.2	Movimento Braccia	72
8.1	Schematizzazione del movimento laterale del centro di massa	76
8.2	Movimento Laterale del robot	77
8.3	Schematizzazione movimento longitudinale	78
8.4	Motori usati per la correzione dell'assetto	81

Sommario

Lo studio della stabilità nella robotica umanoide è uno degli argomenti di ricerca più diffusi. Principalmente gli algoritmi per ottenere camminate stabili si possono suddividere in due categorie: camminate statiche, cioè il robot in ogni istante è sempre in condizione di stabilità; camminate dinamiche, cioè il robot transita da una posizione stabile ad un'altra attraverso un transitorio in cui il robot non è stabile. Il primo approccio è quello più semplice e più facilmente realizzabile. Il secondo, invece, si basa sulla formulazione di modelli fisici del robot, per cui è più complesso ma offre prestazioni, in termini di fluidità e velocità della camminata, superiore al primo.

In questa tesi il problema della stabilità è stato risolto attraverso l'impiego di sensori di inerzia: giroscopi e accelerometri. I giroscopi permettono di valutare la velocità angolare di rotazione, mentre gli accelerometri rilevano l'accelerazione a cui è sottoposto il robot. In particolare si sono utilizzati due giroscopi ad una asse, e due accelerometri a doppio asse.

La prima parte della tesi si occupa di capire in che modo poter utilizzare i sensori inerziali.

I giroscopi vengono usati per calcolare l'orientazione del robot, attraverso un algoritmo di integrazione strapdown. L'orientazione viene rappresentata attraverso l'impiego dei coseni direttori. Una volta nota l'orientazione è possibile calcolare l'inclinazione del robot, naturalmente rispetto alla verticale.

Gli accelerometri come si è già detto, misurano l'accelerazione, quindi anche l'accelerazione di gravità. Sfruttando questa proprietà è possibile utilizzare tali sensori come inclinometri, e quindi derivare l'inclinazione del robot, sempre rispetto alla verticale. Naturalmente questo è possibile solo se il robot è fermo.

Per questa tesi si è poi scelto di implementare una camminata parametrica, cioè

basata su una traiettoria predefinita per i piedi, dalla quale attraverso la cinematica inversa, ricavare la traiettoria delle gambe del robot.

Per quanto riguarda il problema della stabilità si è implementato un controllore in retroazione che corregge la posizione del robot sulla base dei dati dell'assetto ottenuti sfruttando i sensori inerziali.

Alla fine si sono realizzati dei semplici test per la verifica degli algoritmi realizzati. Prima si testerà il sistema di calcolo dell'orientazione. Quindi si andrà a testare il controllore della camminata verificando che risponda in modo corretto alle sollecitazioni esterne.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Robotica Umanoide

La ricerca sui robot umanoidi sta avendo negli ultimi anni una forte crescita. Questo tipo di macchine è generalmente considerato l'evoluzione naturale nel campo della robotica mobile, poichè un robot dotato di gambe, in particolare se bipede, può operare in un ambiente umano in modo più efficiente di quelli su ruote, soprattutto in presenza di scale e ostacoli simili.

Un robot bipede dovrebbe essere in grado di camminare con un'andatura stabile e con un'ampia tolleranza ai disturbi, ma anche avere comportamenti più complessi come muoversi su un terreno accidentato o interagire efficientemente con il proprio ambiente, talvolta cooperando con gli esseri umani; sfortunatamente questo tipo di performance non sono state totalmente raggiunte e lo studio in questo campo si trova ancora al suo periodo infantile.

Gli aspetti da migliorare sono principalmente legati alla costruzione meccanica e agli algoritmi di controllo: il problema della camminata, infatti, noto per la sua complessità è reso particolarmente difficile dalla sua non linearità e dal fatto di essere un processo intrinsecamente caotico e instabile, la cui dinamica è soggetta a fenomeni di discontinuità e variazione temporali.

I robot bipedi possono essere utilizzati per sostituire gli umani in ambienti pericolosi, per esempio con gas tossici o elementi chimici pericolosi, o per eliminare le mine terrestri; un'altra applicazione è l'assistenza agli anziani (suggerito in Giappone, il Paese più attivo nel mondo in questo campo), campo che troverà sicuramente

un terreno fertile dal momento che la vita media dei paesi del mondo industriale si sta innalzando di decennio in decennio.

Una delle soluzioni più vicine nel tempo che è possibile ipotizzare al momento, è quella di costruire un robot con alta mobilità ma di limitata intelligenza, affinché possa essere usato come avatar di un teleoperatore, allo scopo di sostituire la video conferenza attualmente esistente che avviene attraverso il web, con la cosiddetta tele-presenza: la persona deve essere in grado di vedere, parlare e ascoltare attraverso il robot, però colui che lo usa deve essere libero di ignorare i problemi connessi alla navigazione dell'ambiente.

I robot umanoidi sono un soggetto interdisciplinare, collegati a diversi campi quali la meccanica, l'automazione, l'informatica e la bio-meccanica (scienza medica); la connessione con quest'ultimo campo è probabilmente una delle più importanti e andrà aumentando in futuro. La ricerca infatti presuppone di costruire una macchina che imiti una funzione degli esseri umani, senza esattamente sapere come il nostro sistema nervoso può controllare il movimento musco-scheletrico in maniera così efficiente: per questo motivo i dati accumulati dalla medicina sono di certo un buon punto di riferimento per iniziare lo studio della camminata bipede. Guardando questa relazione da un altro punto di vista, possiamo immaginare che un giorno, quando saremo in possesso di robot umanoidi dotati di una maggiore capacità di adattamento, gambe artificiali o altre protesi saranno testate prima su robot antropomorfi che sull'uomo.

1.2 Scopo della tesi

Lo scopo di questa tesi è trovare un algoritmo per stabilizzare la camminata di robot umanoidi.

In letteratura nel corso degli anni, il problema della stabilità della camminata è stato affrontato molte volte e per questo si sono prodotte numerose soluzioni.

I primi approcci hanno riguardato le cosiddette *passive walking* che hanno permesso di capire la dinamica di una camminata bipede.

Una delle prime soluzioni è stata quella della *static walkig*, facili da implementare, che assicurano una camminata stabile.

L'evoluzione finale riguarda le più complesse dynamic walking, che offrono prestazioni ottimali.

I sensori che vengono sfruttati per questi studi sono sensori inerziali (giroscopi e accelerometri) e sensori di forza. Per questo progetto di tesi si hanno a disposizione due giroscopi ad un asse e due accelerometri a due assi.

Prima di implementare l'algoritmo di stabilizzazione della camminata si è studiato il problema di come sfruttare i sensori a disposizione. I giroscopi forniscono una misura di velocità angolare dalla quale attraverso un processo di integrazione è possibile definire una stima dell'orientazione. In questa ottica un interessante lavoro, che però non riguarda direttamente i robot, ma lo studio della camminata umana, mostra in quale modo è possibile utilizzare giroscopio e accelerometri per tale scopo [3]. Infatti il lavoro mostra come utilizzare i dati provenienti dai sensori inerziali per ottenere un errore di inclinazione (rispetto alla verticale) che sarà l'input di un filtro di Kalman per determinare l'errore di orientazione. Tale errore serve per correggere la stima a priori dell'orientazione. Nel nostro caso non è possibile implementare tutto il sistema, in quanto la scheda di acquisizione ha solo 3 ingressi analogici. Da tale lavoro si è preso l'algoritmo per il calcolo dell'orientazione che è descritto in modo più approfondito in [2] [4]. Tale algoritmo si chiama integration strapdown, in quanto i sensori sono montati direttamente sul robot e non si fa uso di nessun sistema cardanico di supporto. L'algoritmo fa uso dei coseni direttori e degli angoli di eulero [1] per effettuare la trasformazione tra due sistemi di riferimento: il body frame che è il sistema di riferimento rispetto al quale si ottengono i dati dei giroscopi, e il global frame che è il sistema di riferimento principale. Una volta ottenuta l'orientazione sfruttando gli angoli di eulero è possibile calcolare gli angoli di pitch, roll e yaw, cioè determinare l'assetto del robot.

Una volta determinato l'assetto del robot, la prima parte della tesi è terminata ed il lavoro si è concentrato quindi sul processo di camminata e su come ottenerne una stabile, attraverso l'utilizzo di sensori inerziali.

Uno degli approcci più utilizzati per creare una camminata stabile è l'utilizzo della tecnica dello ZMP, cioè determinare il punto in cui la somma dei momenti torcenti è nulla [6][17]. Per il calcolo dello zmp solitamente ci si riferisce ad un modello dinamico per la camminata: un modello molto utilizzato è il 3D-LIPM [7]. Sulla base di tale modello si calcola lo ZMP, cioè si ottiene una stima, e poi si

corregge la traiettoria attraverso una misura diretta dello stesso utilizzando sensori di forza. Un modello dinamico alternativo è il cart-model [8].

Nel nostro caso non è possibile implementare una camminata di questo tipo in quanto non si dispone di un modello della dinamica preciso, per il calcolo dell ZMP. Inoltre non si dispone nemmeno di sensori di forza per effettuare una misura diretta di tale parametro.

Per cui l'alternativa è lo sviluppo di una camminata di tipo statico, più semplice da realizzare ma con movimenti lenti. Questo tipo di camminata non è in grado di rispondere ad eventuali disturbi esterni che possono provocare una instabilità della stessa e quindi alla caduta del robot. Nostro scopo sarà quindi, attraverso l'utilizzo dei sensori inerziali, riuscire a identificare la situazione di instabilità e attraverso opportuni interventi ricondurre il robot ad una situazione stabile. In questo campo si possono individuare alcune lavori che si basano sull'utilizzo di giroscopi. In particolare in [12] si individua la possibile instabilità del robot e si risponde aumentando la falcata della camminata in modo da evitare la caduta. Invece in [13] viene implementato un controllore proporzionale che controlla l'orientazione dei piedi sulla base del valore dei giroscopi. Un'altra possibile soluzione è proposta in [10]: in questo caso si suddivide la camminata in più fasi e per ogni fase si va ad individuare un range di velocità angolare all'interno del quale il robot è stabile; se i sensori rilevano una fuoriuscita da tale range sfruttando gli attuatori posizionati sulle caviglie e sulle anche si corregge la posizione.

Nell'algoritmo proposto in questa tesi si ricorre al meccanismo proposto in [10] per individuare le possibili situazioni di instabilità, diverso sarà l'approccio per evitare la caduta. Infatti la camminata alla quale sarà implementato l'algoritmo è una camminata parametrica che si basa su una traiettoria predefinita dei piedi e delle braccia, come è stato mostrato in [26]. In tale lavoro la stabilizzazione della camminata era garantita da un movimento predefinito del corpo del robot, sia nella direzione trasversale che longitudinale alla direzione della camminata. Tale valore sarà corretto a seconda dei dati ricavati dai giroscopi, cioè dal calcolo dell'assetto del robot, così come proposto nella prima parte della tesi.

Quindi tale algoritmo implementato dovrà garantire una camminata stabile anche se il robot subisce una sollecitazione esterna.

1.3 Struttura della tesi

Nel capitolo 2 si fornirà una descrizione del robot utilizzato per gli esperimenti.

Nel capitolo 3 si descrive dal punto di vista teorico i giroscopi, parlando dalle varie tipologie e dei loro principi di funzionamento. Si conclude il capitolo descrivendo il giroscopio a disposizione.

Nel capitolo 4 invece si descrivono gli accelerometri.

Il capitolo 5, invece, riguarda la parte di calcolo dell'orientazione del robot. I primi paragrafi sono dedicati ad una descrizione teorica dell'argomento, attraverso l'introduzione e spiegazione delle basi teoriche. L'ultima parte invece descrive in che modo l'algoritmo è stato implementato.

Il capitolo 6 è una introduzione al problema della camminata bipede.

Nel capitolo 7 viene descritta la camminata implementata

Il capitolo 8 è dedicato alla spiegazione del controllore implementato.

Nel capitolo 9 si possono trovare le conclusioni e come tale lavoro potrà essere utilizzato in futuro.

Capitolo 2

Il Kondo

2.1 Descrizione

Il KHR-1HV è un robot umanoide in grado di eseguire una vasta gamma di movimenti, dal camminare alle acrobazie, incluse capovolte sia in avanti che all'indietro, passando addirittura per le arti marziali.



Figura 2.1: Kondo 1HV

Questa versione, rispetto alle precedenti, introduce due ulteriori gradi di libertà che permettono il movimento di rotazione delle anche, capaci di rendere la camminata più fluida e più umana. I gradi di libertà totali del robot sono in questo modo 19, distribuiti come segue:

- 1 per collo,
- 3 per ogni braccio,
- 6 per ogni gamba

Ogni grado di libertà è un giunto rotante realizzato da servomotori. I servomotori usati sono del tipo *KRD-788HV ICS Digital Servos* con le seguenti caratteristiche:

- Coppia: $10Kg - cm$
- Velocità $0.14sec/60$
- Voltaggio $9 - 12V$
- Dimensioni: $41mm \times 35mm \times 21mm$
- Peso: $47.5g$
- Raggio d'azione: $180gradi$

Fanno eccezione i due servomotori delle spalle che sono del tipo *KRS-4024 ICS Digital Servos* con queste due caratteristiche:

- Coppia: $10.5Kg - cm$
- Velocità $0.17sec/60$
- Voltaggio $9 - 12V$
- Dimensioni: $41mm \times 32mm \times 32.5mm$
- Peso: $52g$
- Raggio d'azione: $260gradi$

Tutti i servomotori restituiscono alla scheda di controllo una stima della loro posizione raggiunta.

Il KHR-1HV misura 377 mm in altezza e 179 mm in larghezza (con le braccia a riposo), per un peso totale di $1,510\text{ kg}$.

Il Kondo può comunicare con un PC tramite seriale RS232C (nella versione a disposizione si sfrutta un adattatore USB), che garantisce una velocità di trasmissione di 115 kbps , oppure tramite connessione Wi-Fi.

Il software fornito assieme al robot si chiama *HeartToHeart3* (funzionante solo con Windows 2000, Xp e Vista) e permette tramite una semplice interfaccia grafica di programmare, con l'usa di drag & drop e flow chart, ogni singola mossa che andrà a costruire i movimenti più complessi. Tale software offre anche una efficiente ed intuitiva interfaccia grafica per la gestione di giroscopi e acellerometri.

Per questa tesi la programmazione del robot avviene in ambiente linux, sfruttando delle librerie sviluppate in c++ all'interno del gruppo di Robotica Autonoma dell'Università di Padova, che realizzano tutte le funzioni necessarie per il controllo del robot.

2.2 La scheda RCB-3HV

Per comandare i movimenti del robot ed accedere alla lettura dei dati provenienti dai giroscopi e dagli acellerometri, è fondamentale la scheda RCB-3HV (fig. 2.2). Tale scheda permette l'esecuzione di comandi ad alta velocità, multi-tasking e operazione master/slave.



Figura 2.2: Scheda RCB-3HV

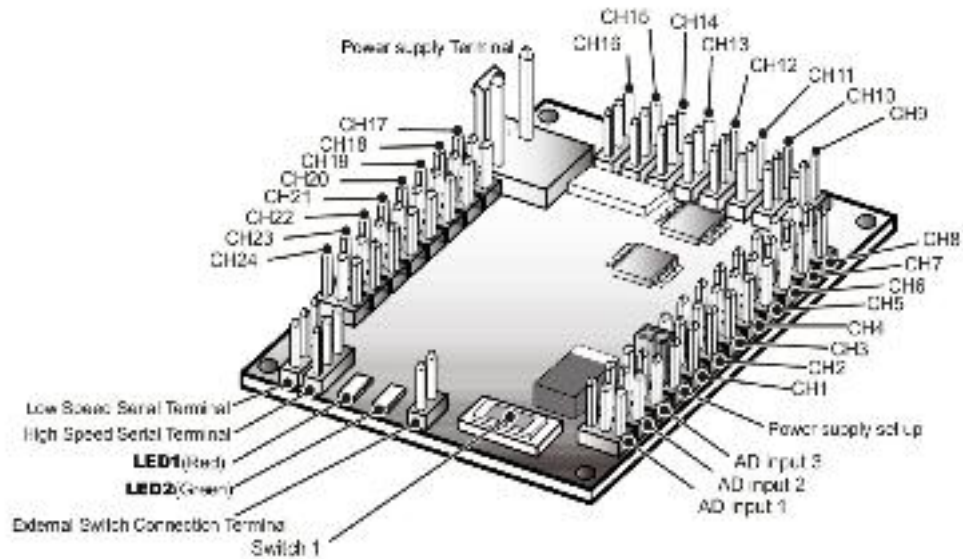


Figura 2.3: Schema della scheda RCB-3HV

La scheda è dotata di 24 porte digitali di input/output, ognuna in grado di controllare un servomotore o altri dispositivi simili. Sono presenti inoltre 3 entrate analogiche, alle quali saranno collegati i giroscopi e gli accelerometri. Lo schema di come sono disposti tali porte è visibile in figura 2.3.

Capitolo 3

Giroscopio

Il giroscopio è un dispositivo usato per misurare il movimento di rotazione di un corpo in uno spazio inerziale, intorno ad un dato asse. Per la misurazione del moto di rotazione di una piattaforma nello spazio inerziale, ci sono attualmente in uso giroscopi ottici e meccanici.

3.1 Tipi di giroscopi

Esistono 3 tipologie di giroscopi in commercio, di differente prezzo e di differenti prestazioni, quindi adatti a usi diversi.

La prima categoria è quella dei giroscopi meccanici, il cui funzionamento si basa sullo stesso principio fisico per cui una trottola che ruota rimane in equilibrio senza cadere. In commercio si trovano anche giroscopi ottici basati sull'effetto Sagnac. La terza ed ultima categoria riguarda i giroscopi MEMS (Micro Electro Mechanical System).

3.1.1 giroscopio meccanico

Il giroscopio meccanico basato sulla inerzia di un rotore, è conosciuto già dai primi del 1800. Il primo giroscopio fu costruito in germania 1810 da G.C. Bohnenberger. Nel 1852 il celebre francese L. Foucault mostrò che il giroscopio è in grado di percepire la rotazione terrestre.

Vediamo come funziona un giroscopio meccanico: il rotore pilotato elettricamente è sospeso ai propri assi da una coppia di cuscinetti con attrito bassissimo. I cuscinetti

a loro volta sono montati su un anello ruotante chiamato anello di sospensione interna (inner gimbal ring). Questo anello gira a sua volta all'interno di un altro anello (outer gimbal ring). La rotazione dell'anello interno definisce l'asse x del giroscopio che è perpendicolare con l'asse di rotazione del rotore, l'anello esterno definisce l'asse verticale del giroscopio. In questa struttura è da notare come l'asse orizzontale sarà allineato con il meridiano, in questo modo si potrà calcolare la rotazione orizzontale e verticale in funzione a quella terrestre.

3.1.2 giroscopio ottico

Il principio su cui si basa il funzionamento dei giroscopi ottici fu scoperto dal fisico francese Sagnac nel 1913 ed ha trovato inizialmente una sua applicazione nella costruzione di interferometri e successivamente nei giroscopi laser ad anello chiuso (RLG, Ring Laser Gyro). Tale principio consiste nello sdoppiare un unico raggio luminoso in due diversi raggi, che viaggiano su un medesimo percorso ottico ad anello chiuso; ma in direzioni opposte: un raggio ruota in senso orario e l'altro in senso antiorario. Quando un raggio si propaga, la sua fase cambia continuamente con la distanza L percorsa e precisamente di 2π radianti per ogni tratto pari alla lunghezza d'onda λ ; si ha pertanto:

$$\alpha = \frac{2\pi L}{\lambda}$$

con $\lambda = \frac{c}{f}$, dove f è la frequenza del raggio luminoso e c la velocità della luce.

Nel caso in cui il giroscopio sia fisso rispetto ad un sistema inerziale, i due raggi percorrono lo stesso cammino, anche se in direzioni opposte, arrivando nel ricevitore con la stessa fase. Diversa è la situazione in cui l'intero sistema ruota attorno ad un asse passante per O (asse sensibile del giroscopio) e con velocità angolare ω ; in tal caso il percorso del raggio concorde con il verso di rotazione tende ad allungarsi, mentre quello dell'altro raggio tende ad accorciarsi per cui la differenza di fase ϕ dei segnali che arrivano nel ricevitore non è più nulla, ma assume la seguente espressione:

$$\Theta = \Delta\alpha = \frac{2\pi LD}{c\lambda}\Omega$$

Dove:

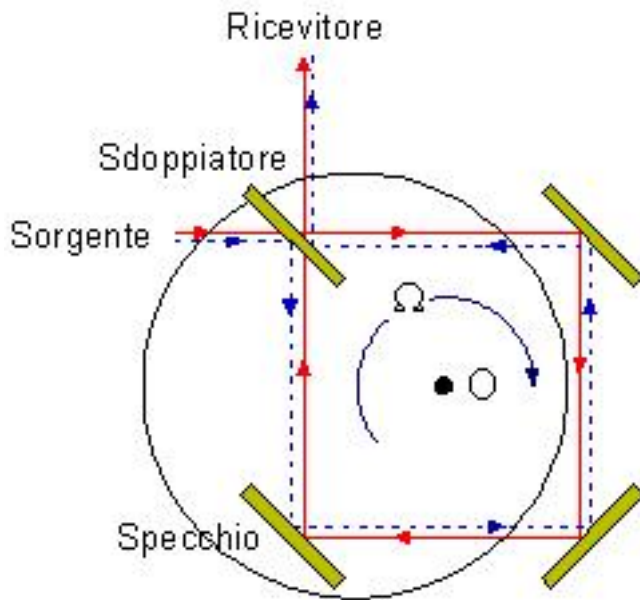


Figura 3.1: Effetto Sagnac

- L = lunghezza del percorso ottico o delle fibre ottiche nei FOG
- D = diametro del percorso o della bobina nei FOG
- ω = velocità angolare del giroscopio attorno al suo asse sensibile

Il fattore davanti alla velocità angolare ω è chiamato fattore di scala ed è un indicatore della sensibilità dello strumento; più è alto tale fattore, più lo strumento è in grado di misurare velocità angolari molto basse, come ad esempio nel caso di quella terrestre.

Ring Laser Gyro

Agli inizi degli anni '60, con l'invenzione dei Laser, è nato il Ring Laser Gyro, il quale va a sostituire i tradizionali giroscopi meccanici. Nel RLG la luce laser è enervata in esso, riempiendo lo spazio tra gli specchi di un mezzo attivo opportunamente eccitato. Il mezzo attivo è una miscela di gas Elio e Neon.

Da tale mezzo si generano due fasci di luce laser che viaggiano in senso opposto in un cammino luminoso chiuso, formato da specchi che devono limitare le perdite di energia ai livelli bassi.

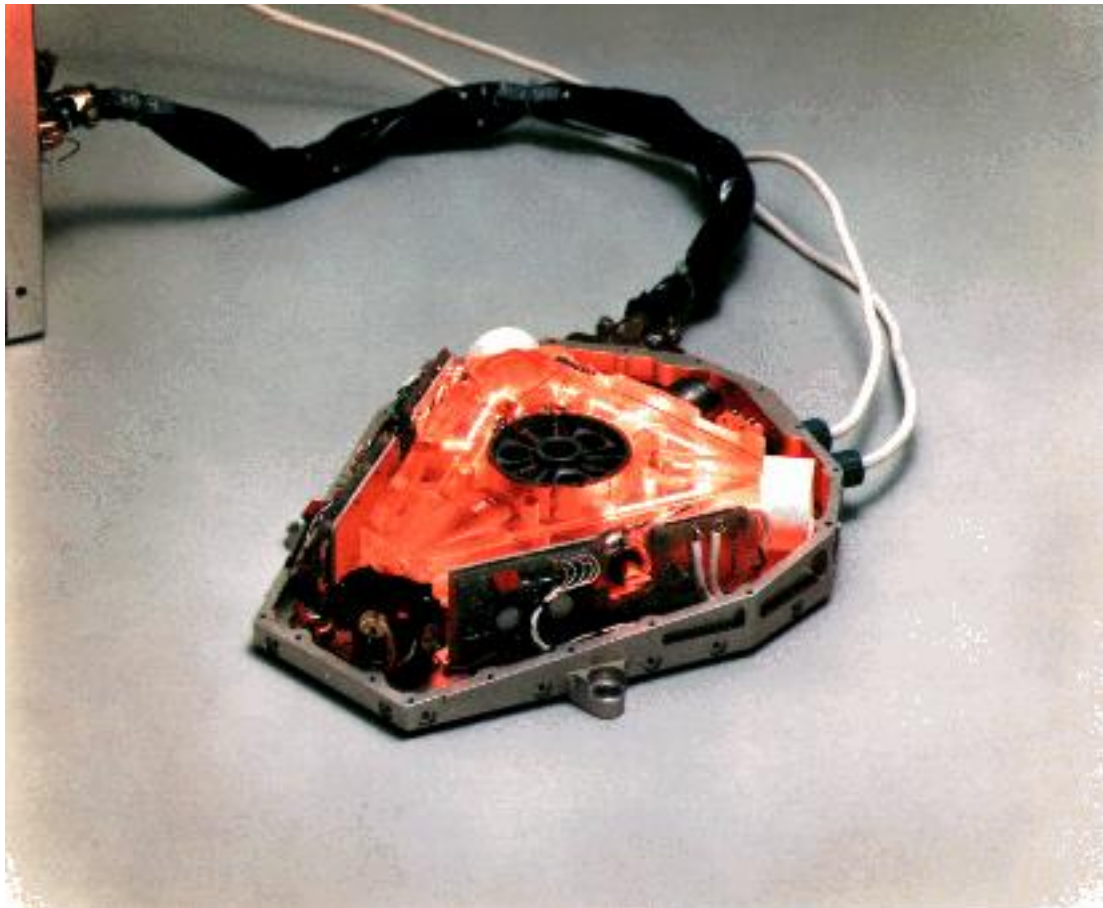


Figura 3.2: Ring Laser Gyro

Fibrer Optic Gyro

Il rapido sviluppo dei calcolatori digitali, la loro potenza e la loro elevata affidabilità hanno portato alla realizzazione di giroscopi ottici basati su fibre ottiche.

Tali giroscopi sono molto diffusi per i numero vantaggi, rispetto ai giroscopi basati su anello laser, tra i quali è utile ricordare:

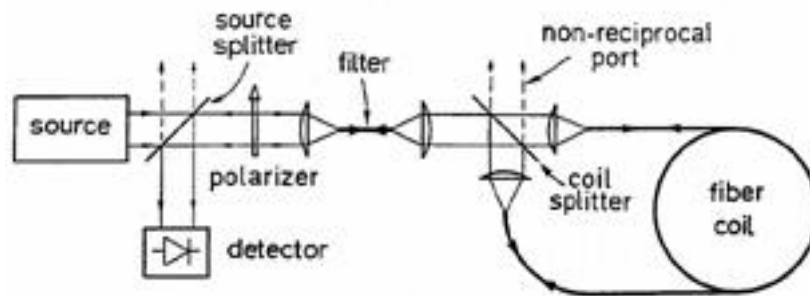
- funzionamento istantaneo, cioè non richiedono un periodo di riscaldamento prima di essere utilizzati
- la possibilità di conservazione per lunghi periodi in magazzino, senza avere la necessità di una costante manutenzione

Purtroppo soffrono di una bassa sensibilità ed una bassa accuratezza nelle misurazione da loro effettuate. I FOG stanno trovando applicazione in quei sistemi che

non necessitano di una elevata precisione per lunghi periodi di tempo, come la guida di proiettili e missili.

Il circuito ottico è formato da fibre ottiche. Il raggio proveniente da una sorgente di luce esterna al circuito, è suddiviso in due raggi da un partitore e vengono diretti, in senso opposto, ai due estremi di una bobina di fibre ottiche a molte spire.

La rotazione della bobina produce una variazione di fase dei due fasce secondo l'effetto Sagnac.



(a)



(b)

Figura 3.3: Fibre Optic Gyro a) Schema di un FOG b) FOG

3.1.3 giroscopio MEMS

I giroscopi di tipo MEMS sono principalmente costruiti da masse mobili. Tali masse si muovono all'interno del giroscopio ed il loro spostamento provoca una variazione di tensione che viene letta come una velocità angolare.

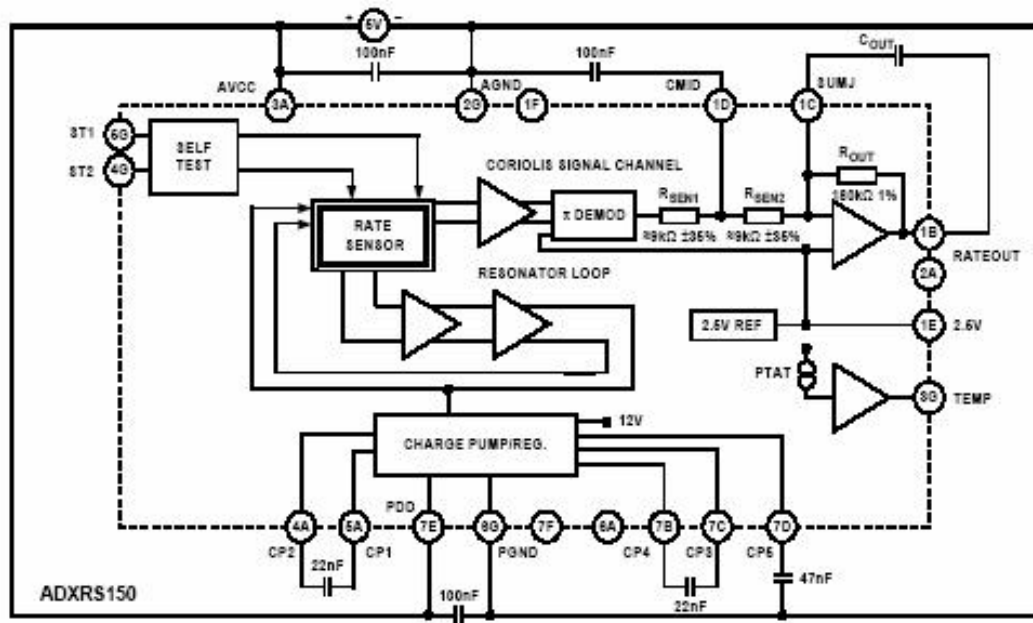


Figura 3.4: Schema funzionale MEMS Gyro

3.2 Calibrazione del giroscopio

I giroscopi basati su tecnologia ottica (Laser, fibre ottiche) sono molto più precisi; per mantenere il loro alto livello di precisione necessitano di controlli periodici. Per questo motivo essi hanno un costo molto elevato.

Tale costo non si giustifica se il sistema che si deve realizzare non necessita di una alta precisione e sensibilità.

Proprio per questo motivo nell'ultimo decennio la tecnologia MEMS ha avuto una notevole diffusione. Tali sensori hanno sicuramente il vantaggio di avere costi bassi, ma necessitano forzatamente di un processo di calibrazione, prima del loro utilizzo, in modo da eliminare la maggior parte degli errori sistematici.

3.2.1 Bias traslazionale

Il bias è l'uscita media del giroscopio, quando esso non è soggetto a nessuna rotazione. La presenza di una bias nel dispositivo provoca una traslazione dei valori della velocità angolare (vedi fig. 3.5). Solitamente il bias è un valore costante, anche se può subire variazioni nel tempo.

È possibile stimare questo valore considerando l'uscita media di un elevato numero di campioni quando il giroscopio non è soggetto a nessuna rotazione.

Una volta nota tale valore è possibile compensarlo semplicemente sottraendolo all'uscita del giroscopio.

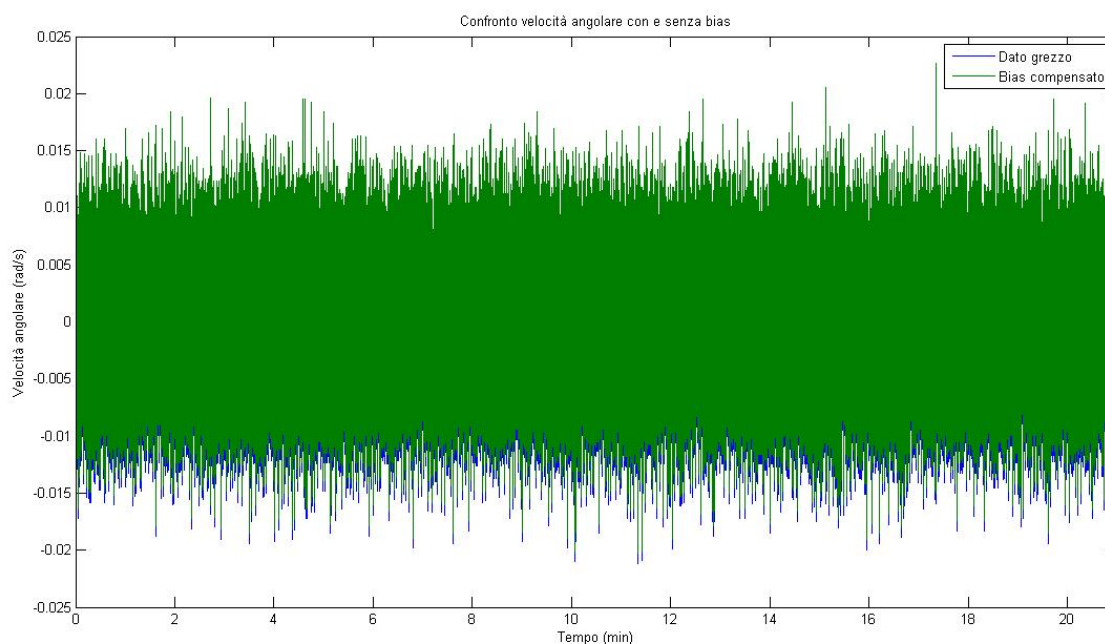


Figura 3.5: Effetto del bias

3.2.2 Fattore di scala

Una misurazione strumentale può essere caratterizzata da un fattore di scala di entità diversa da uno. La presenza di un fattore di scala provoca un aumento della rumorosità (ovvero, una maggior dispersione) rispetto al dato grezzo (fig. 3.6).

3.2.3 Deriva dei giroscopi

I dati provenienti dai giroscopi per essere elaborati, devono subire un processo di integrazione in modo da poter ricavare una misura angolare dalla velocità angolare.

La presenza del bias, costante in tutte le misure, nel processo di integrazione causa uno scostamento costante dal valore reale. Tale fenomeno prende il nome di deriva dei giroscopi.

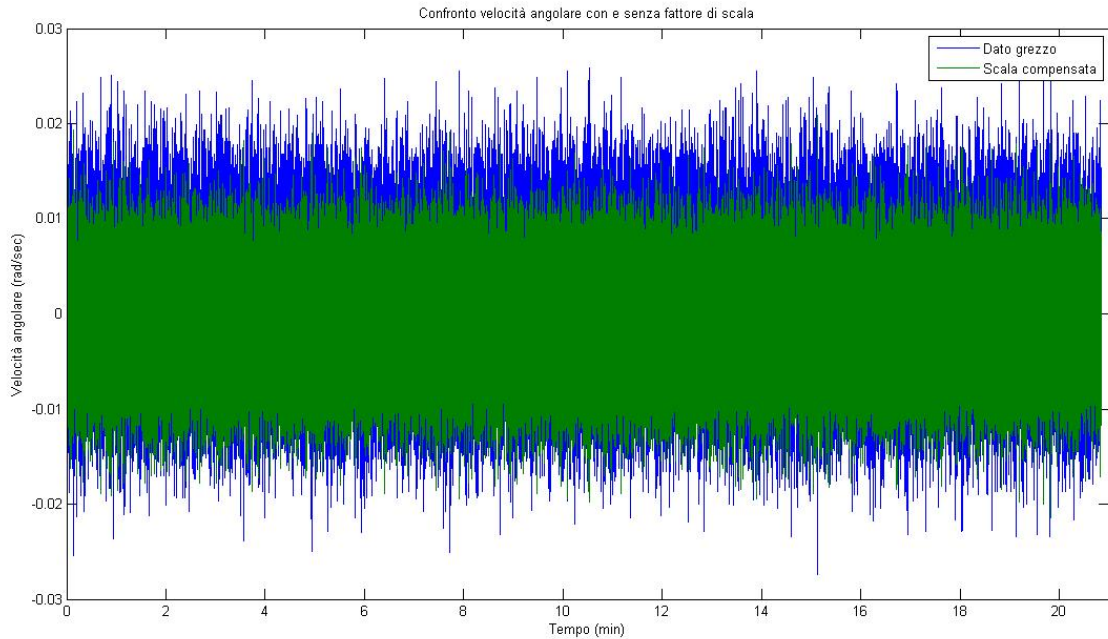


Figura 3.6: Fattore di Scala non nullo

3.2.4 Rumore termo-meccanico

L'uscita dei giroscopi può essere perturbata da alcuni rumori di origine termo-meccanica. I campioni ottenuti saranno quindi perturbati da rumore gaussiano bianco, che sarà rappresentato da una variabili casuali incorrelate a media nulla.

Questo tipo di rumore non può essere trattato dalla procedura di calibrazione, ma si devono utilizzare metodologia di elaborazione di segnali apposite.

Solitamente si utilizzano filtri passa-basso calibrati sulla banda passante del sensore. Una metodologia molto usata è l'utilizzo del filtro di Kalman.

3.3 KRG-3

I giroscopi disponibili nel laboratorio di Robotica Autonoma ed utilizzati in questo progetto di tesi sono i KRG-3 prodotti dalla Kondo (fig. 3.7).

Tali giroscopi sono prodotti esplicitamente per essere utilizzati con i robot umanoidi prodotti dalla stessa casa. È compatibile infatti con la scheda RCB-3HV con la quale

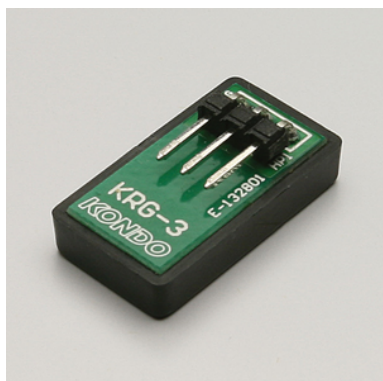


Figura 3.7: KRG-3

interagisce attraverso i e ingressi analogici. Comunque è compatibile con qualsiasi dispositivo che lavora con una convertitore analogico-digitale calibrato su 0-5V (per esempio Robonova, Phidgets 8/8/8, e Serializer).

Il KRG-3 è un giroscopio ad un asse, costruito con tecnologia di tipo MEMS. Le sue caratteristiche costruttive sono le seguenti:

- Altezza: 7.8 mm
- Lunghezza: 22.5 mm
- Larghezza: 12.5 mm
- Peso: 1.8g

Quando il sensore è ha riposo, fornisce una tensione costante, di 1.36V. Una rotazione oraria causa un aumento di tale tensione, una rotazione antioraria invece causa una diminuzione di tale valore.

L'aumento (diminuzione) di tensione è proporzionale alla velocità angolare rilevata: un aumento o diminuzione di 0.67mV equivale ad una variazione di 1 Deg/sec.

Capitolo 4

Accelerometro

Gli accelerometri sono componenti in grado di rilevare un'accelerazione lungo il loro asse, oppure lungo i loro assi se l'accelerometro è costruito a più assi.

In figura ?? è possibile vedere uno schema a blocchi di un accelerometro triassiale, comunque in commercio si trovano anche accelerometri biassiali e monoassiali.

L'utilizzo degli accelerometri negli ultimi anni è notevolmente cresciuto: infatti il suo utilizzo non è più limitato ai campi scientifici e aereospaziali, ma si è diffuso notevolmente in molte applicazioni di uso civile.

Per la maggior parte degli accelerometri il principio di funzionamento risulta essere il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad una accelerazione.

Tale massa inerziale è sospesa ad un elemento elastico e qualche altro tipo di sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla parte fissa del dispositivo. Quando si è in presenza di una accelerazione, la massa si sposta dalla posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione; il sensore rileva tale spostamento e converte tale misura in un segnale elettrico.

Gli accelerometri, quindi, si possono suddividere in base al tipo di sensore che viene utilizzato per rilevare lo spostamento della massa inerziale mobile rispetto alla massa fissa del sensore.

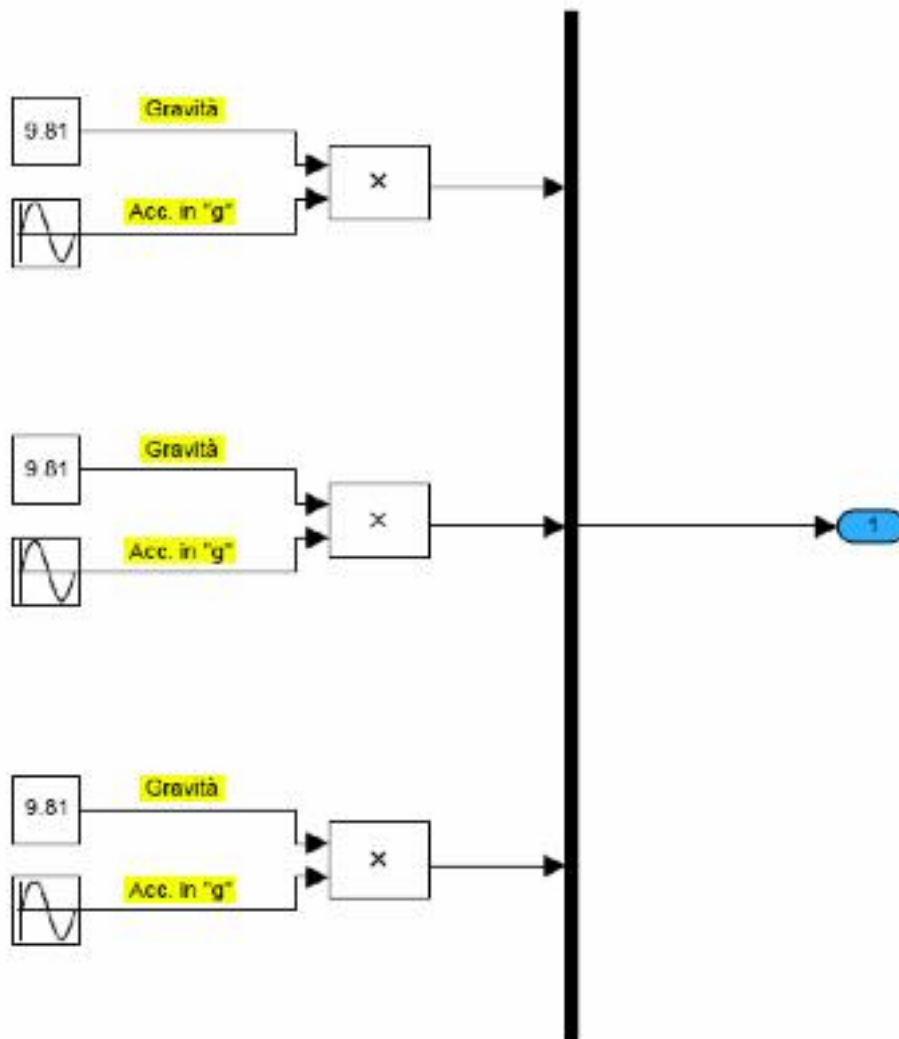


Figura 4.1: Schema a blocchi di un accelerometro

4.1 Tipi di Acelerometri

4.1.1 Accelerometro estensimetrico

L'accelerometro a ponte estensimetrico sfrutta per la rilevazione dello spostamento la variazione di resistenza di un estensimetro dovuta alla variazione della sua lunghezza.

Un estensimetro è uno strumento di misura utilizzato per rilevare piccole deformazioni dimensionali di un corpo sottoposto a sollecitazioni meccaniche o termiche. Un estensimetro elettrico a resistenza è costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico. L'estensimetro viene applicato sulla superficie del corpo di cui si vuole rilevare le deformazioni. Tale filo si allunga e si accorcia a secondo di come la superficie del corpo si deforma causando una variazione della resistenza elettrica del filo. Solitamente si utilizza un ponte di Wheatstone (fig. 4.3) per rilevare tali variazioni e quindi risalire all'entità della deformazione che le ha causate.

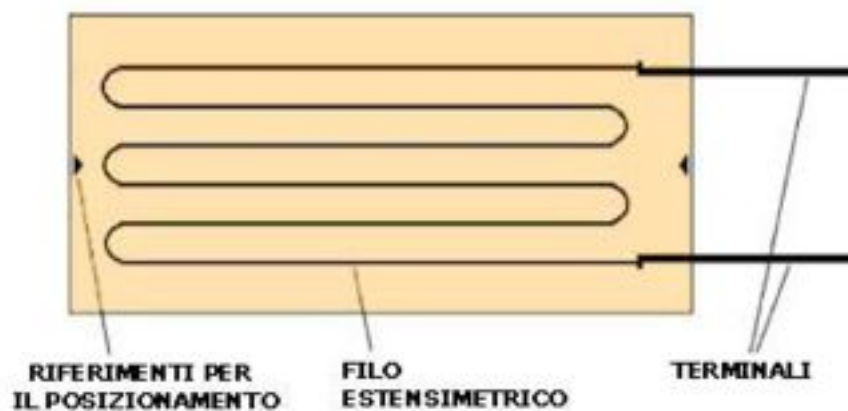


Figura 4.2: Estensimetro elettrico a resistenza

La massa inerziale viene sospesa su due lamierini, su questi ultimi sono fissati degli estensimetri: se la massa mobile subisce una accelerazione i lamierini vengono di conseguenza deformati. La deformazione dei lamierini, proporzionale all'accelerazione, è quindi rilevata dagli estensimetri e convertita in un opportuno segnale elettrico.

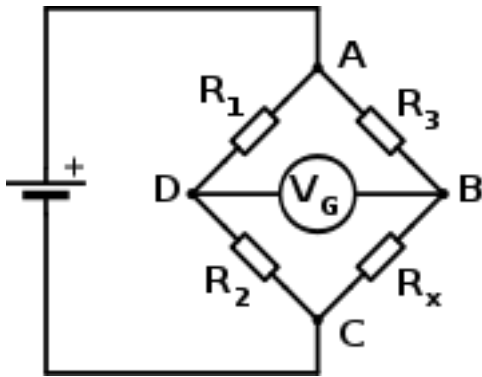


Figura 4.3: Ponte di Wheatstone

4.1.2 Accelerometro piezoresistivo

L'accelerometro a ponte piezoresistivo è una variante dell'accelerometro a ponte estensimetrico, dove al posto degli estimetri sono utilizzati sensori piezoresistivi.

I sensori piezoresistivi sono utilizzati per rilevare grandezze meccaniche. Questi sensori basano il loro funzionamento sul principio fisico della piezoresistenza. Si comportano come gli estensimetri ma permettono una sensibilità maggiore.

4.1.3 Accelerometro LVDT

L'accelerometro LVDT sfrutta, come principio per la rilevazione dello spostamento della massa, un sensore LVDT (Linear Variable Differential Trasformer) integrato nella struttura dell'accelerometro stesso.

LVDT è composto da un tubo formato da tre avvolgimenti disposti lungo lo stesso e con all'interno un nucleo cilindrico ferromagnetico mobile. L'avvolgimento centrale è detto primario e gli altri due secondari: quello primario è collegato ad un generatore di tensione AC, ai capi dei secondari si rileva la tensione di uscita.

Un apposito circuito rileva la posizione del nucleo rispetto alla bobine e genera un segnale elettrico proporzionale allo spostamento rispetto alla posizione di riposo.

4.1.4 Accelerometro capacitivo

In questo tipo di accelerometri lo spostamento è rilevato valutando la variazione di capacità di un condensatore dovuta alla variazione della distanza delle armature del

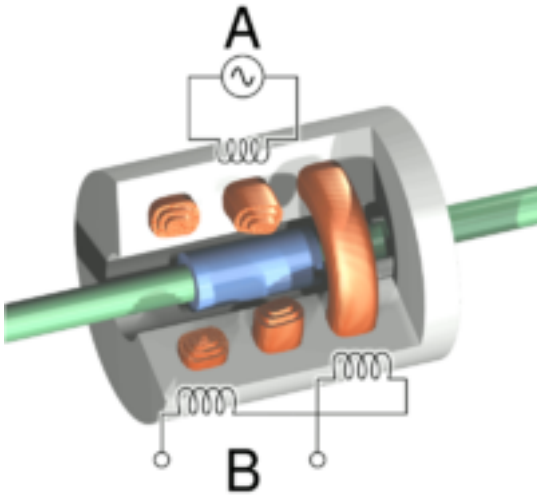


Figura 4.4: Linear Variable Differential Trasformer

condensatore stesso.

La massa costituisce un'armatura mentre l'altra è posizionata nella struttura fissa del dispositivo. La massa subendo una accelerazione si sposta: tale spostamento varia la distanza delle armature e quindi la capacità. Un apposito circuito rileva la capacità e lo trasforma in un segnale elettrico proporzionale all'accelerazione.

4.1.5 Accelerometro piezoelettrico

Questo tipo di accelerometri si basano sulla proprietà di piezoelettricità di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono sottoposti a deformazione meccanica. Infatti quando questo genere di cristalli subisce una compressione o decompressione, sulle facce opposte del cristallo si accumulano cariche di segno opposto, proprio come accade ai condensatori sottoposti ad una differenza di potenziale. Se si collega tali cristalli ad un circuito elettrico si ottiene una corrente detta corrente piezoelettrica.

La massa mobile in questi accelerometri è sospesa sul cristallo piezoelettrico, che costituisce sia il sensore che il componente elastico. In presenza di una accelerazione la massa comprime il cristallo che genera un segnale elettrico proporzionale alla compressione subita.

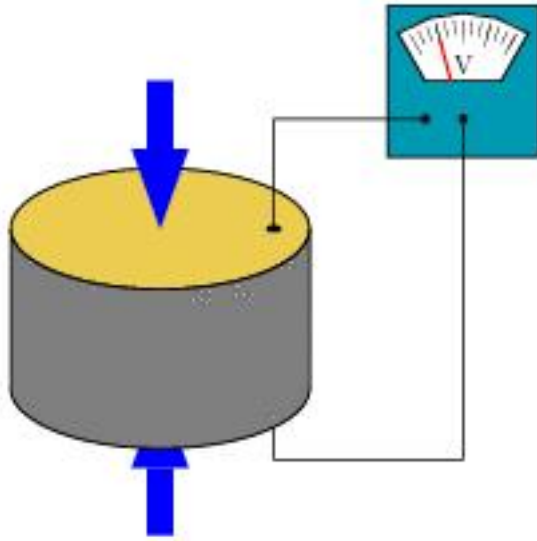


Figura 4.5: Schema cristallo piezoelettrico

4.1.6 Accelerometro Laser

Questo tipo di accelerometri sono molto costosi e vengono impiegati solamente nei casi in cui sia richiesta una elevata precisione.

Il sensore è composto da un interferometro laser che misura istante per istante lo spostamento dell'oggetto in moto. L'interferometro è collegato ad un computer il quale fornisce l'accelerazione dell'oggetto semplicemente calcolando la derivata seconda dello spostamento ottenuta dall'interferometro.

4.2 Calibrazione degli accelerometri

Anche gli accelerometri necessitano di una procedura di calibrazione dovuta alla presenza del bias e di un eventuale fattore di scala non nullo.

È altresì necessario filtrare i dati per eliminare l'effetto del rumore gaussiano bianco dovuto a fattori termo meccanici. Le metodologie più usate sono filtri passa basso calibrati sulla banda passante del sensore, l'utilizzo del filtro di Kalman.

Gli accelerometri sono utilizzati per ridurre il drift ed il rumore presente nei giroscopi utilizzando tecniche di fusin sensor come il filtro di Kalman.

4.3 RAS-2

L'accelerometro in dotazione al laboratorio è l'RAS-2 progettato e distribuito dalla Kondo.



Figura 4.6: RAS-2

L'RAS-2 è un accelerometro a due assi (fig. 4.7). Le caratteristiche di tale sensore sono le seguenti:

- $\pm 1.5g$
- Output: 800mv/g
- Massima frequenza: 300 Hz
- Temperatura di lavoro: $0-70\text{ deg}$
- Alimentazione $3-5V$

Tale accelerometro rientra nella categoria degli accelerometri statici, cioè quei sensori che sono in grado di rilevare accelerazione che hanno una frequenza massima di 500Hz .

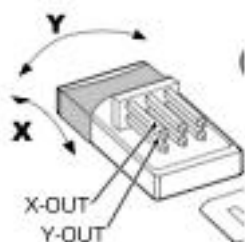


Figura 4.7: Disposizione degli assi nell'RSA-2

Capitolo 5

Calcolo dell'orientazione del robot

Per il calcolo dell'assetto del robot, cioè stimare gli angoli di Pitch, Roll e Yaw, si sfruttano i sensori inerziali, cioè i giroscopi e gli accelerometri.

In particolare i dati provenienti dai giroscopi saranno integrati per ottenere l'orientazione del robot, da cui ricavare la stima dei tre angoli dell'assetto.

Utilizzando sensore inerziali è essenziale definire un sistema di riferimento inerziale per dare un significato ai dati ottenuti. In particolare i dati provenienti dai sensori faranno riferimento ad un sistema di riferimento locale, detto body frame. Infatti i dati dei giroscopi, in particolare, forniscono variazioni dell'assetto locali. Tale sistema di riferimento infatti è solidale con il robot stessi

Per avere la stima dell'assetto del robot, bisogna ricondurre i dati ad un sistema di riferimento fisso e non solidale con il robot, la cui origine è la medesima del body frame, ma può avere una orientazione differente.

Per passare dal body frame al global frame è necessario effettuare delle trasformazioni di coordinate. Per effettuare tale trasformazione si possono utilizzare differenti tecniche, tra cui gli angoli di eulero o i quaternioni.

5.1 Descrizione dei sistemi di riferimento

5.1.1 Sistema di riferimento body

Il sistema di riferimento body è quello solidale al robot.

Per questo sistema di riferimento gli assi sono orientati nel seguente modo:

- L'asse x è orientato secondo il senso di marcia del robot (direzione longitudinale)
- L'asse y è trasversale al senso di marcia ed ha direzione uscente dalla destra del robot
- L'asse z è ortogonale all'asse x e y ed è orientato verso l'alto
- L'origine di tale sistema è posto in cima al robot stesso.

5.1.2 Sistema di riferimento globale

Il sistema di riferimento globale, è il sistema rispetto al quale si determina l'assetto del robot.

Tale sistema è fisso e questa è la principale differenza con il sistema di riferimento body, che invece si muove solidalmente con il robot.

È orientato come il body frame nella fase iniziale, quando non si è rilevato ancora nessun cambiamento di assetto.

5.2 Gli angoli di Eulero

Gli angoli di Eulero sono usati per descrivere l'orientamento relativo di una terna mobile ($Ox_1y_1z_1$) rispetto ad una terna base ($Oxyz$). Il metodo degli angoli di Eulero permette di scomporre la rotazione globale in tre rotazioni fondamentali.

Gli angoli di Eulero più comunemente utilizzati sono quelli di tipo ZYZ e di tipo RPY (Roll, Pitch e Yaw).

Il nome ZYZ deriva dal fatto che si usano tre rotazioni elementari consecutive attorno agli assi z , y e ancora z della terna corrente.

Il nome RPY deriva dalle rotazioni, attorno di volta in volta ad un determinato asse, di un dato angolo. Ogni angolo di rotazione prende un nome, che sarà Roll, Pitch o Yaw a seconda di quale rotazione si sta eseguendo.

5.2.1 Rotazione attraverso gli angoli di Eulero

Date le terne $Oxyz$ e $Ox_1y_1z_1$, come mostrato nella figura 3.2, identifichiamo la retta tra il piano xy e il piano x_1y_1 : tale retta si dice linea dei nodi.

Viene ora eseguita una prima rotazione della terna $Oxyz$ di un angolo φ attorno all'asse z , fino a che l'asse y non coincida con la linea dei nodi, come mostrato in figura 5.1: Si ottiene così la nuova terna $Ox'y'z'$ avente l'asse y' lungo la linea dei

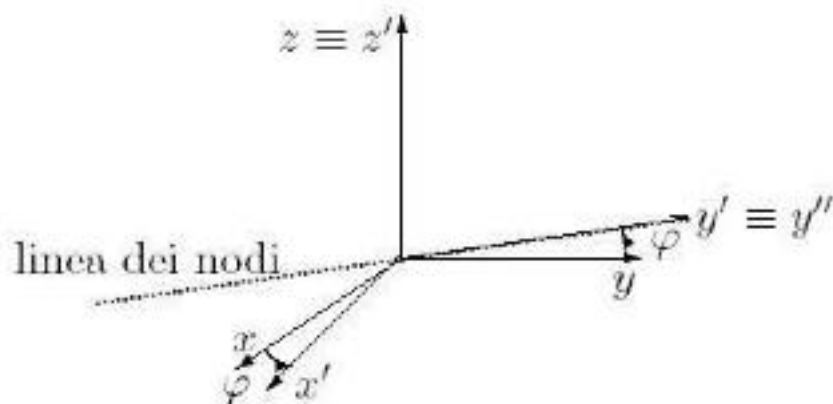


Figura 5.1: Rotazione attorno all'asse z (rotazione 1)

nodi e l'asse z' coincidente con l'asse z . L'angolo φ è l'angolo formato dall'asse y e dalla linea dei nodi, scelto positivo se concorde con z .

Viene ora eseguita una rotazione della terna $Ox'y'z'$ di un angolo Θ attorno all'asse y' , fino a che l'asse z' non coincida con l'asse z_1 : Come visibile nella figure

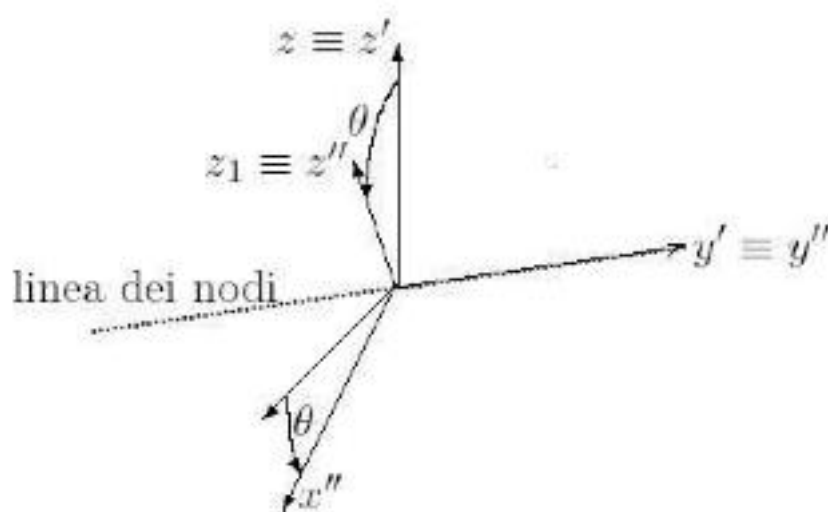


Figura 5.2: Rotazione attorno all'asse y' (rotazione 2)

5.2 si ottiene una nuova terna $Ox''y''z''$ avente l'asse z'' coincidente con l'asse z_1 e

gli assi x'' e y'' nel piano x_1y_1 . L'angolo Θ è l'angolo formato dall'asse z e dall'asse z_1 , scelto positivo se concorde con y'_1 .

Come ultimo passaggio si esegue una rotazione della terna x'' e y'' di un angolo Ψ attorno all'asse z'' , fino a che l'asse y'' non coincide con l'asse y_1 : A questo punto la

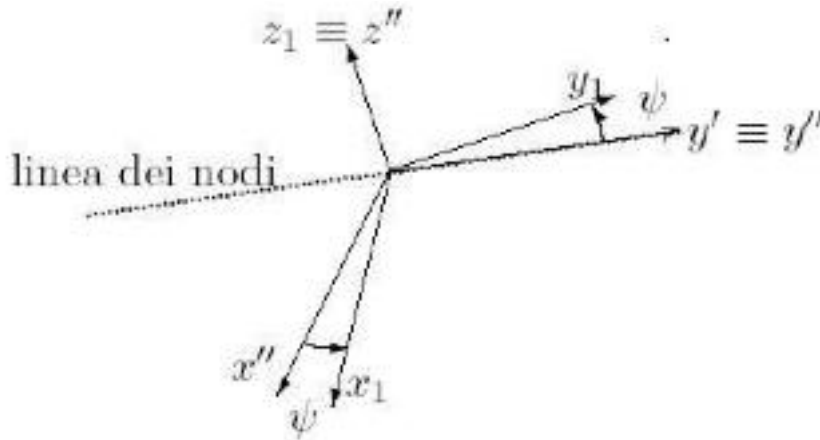


Figura 5.3: Rotazione attorno all'asse z'' (rotazione 3)

terna corrente è coincidente con $Ox_1y_1z_1$ e la trasformazione è completa. L'angolo Ψ è l'angolo formato dall'asse y_1 e dalla linea dei nodi, che è orientata come y' , scelto positivo se concorde con z_1

5.3 Le matrici dei cosini direttori

Le matrici di rotazione, dette matrici dei cosini direttori, sono un metodo di trasformazione ridondante, in quanto occorrono 9 parametri per definire l'orientamento di una terna rispetto ad un'altra, invece dei canonici 3. Questo è il problema principale dell'utilizzo di tale metodo di trasformazione.

Si supponga di avere due sistemi di riferimento $Oxyz$ e $Ox'y'z'$ con origine comune in O , e di volerne sapere l'orientamento relativo, il procedimento è illustrato di seguito.

Siano i, j, k i versori degli assi x, y, z , mentre i', j', k' i versori della terna $x'y'z'$; se si scompone il versore i' lungo le tre direzioni i, j, k si trova la seguente relazione:

$$i' = i'_x i + i'_y j + i'_z k \quad (5.1)$$

e analogamente per gli altri due versori:

$$j' = j'_x i + j'_y j + j'_z k \quad (5.2)$$

$$k' = k'_x i + k'_y j + k'_z k \quad (5.3)$$

Mettendo le tre relazioni in forma matriciale si ottiene:

$$R = \begin{bmatrix} i' & j' & k' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_x & j'_x & k'_x \\ i'_y & j'_y & k'_y \\ i'_z & j'_z & k'_z \end{bmatrix}$$

La matrice R ottenuta è detta *matrice di rotazione*.

Proiettando le 5.1, 5.2 e 5.3 lungo le direzioni dei versori i, j, k si ottengono le relazioni seguenti:

$$\begin{aligned} i'_x &= i' i = i'^T i \\ i'_y &= i' j = i'^T j \\ i'_z &= i' k = i'^T k \\ j'_x &= j' i = i'^T i \\ j'_y &= j' j = i'^T j \\ j'_z &= j' k = i'^T k \\ k'_x &= k' i = k'^T i \\ k'_y &= k' j = k'^T j \\ k'_z &= k' k = k'^T k \end{aligned} \quad (5.4)$$

Gli elementi della matrice R si dicono *cosini direttori* in quanto ognuno di loro è prodotto scalare di un versore della terna $Ox'y'z'$ per un versore della terna $Oxyz$. É bene ricordare che il prodotto scalare tra due versori è pari al prodotto dei moduli per il cosino dell'angolo compreso: due versori hanno entrambi modulo unitario, pertanto il loro prodotto scalare è pari al cosino dell'angolo compreso, da cui il termine *cosini direttori*.

Sapendo che sono valide le seguenti proprietà:

$$\begin{aligned} i'^T i &= 1 & j'^T j &= 1 & k'^T k &= 1 \\ i'^T j &= 0 & j'^T k &= 0 & j'^T i &= 0 \end{aligned} \tag{5.5}$$

è possibile affermare che la matrice è ortogonale, perchè $R^T R = 1$ e quindi $R^T = R^{-1}$.

5.4 I quaternioni

I quaternioni furono scoperti e studiati da Hamilton nel XIX secolo, precisamente lo studio iniziò nel 1843.

In pratica i quaternioni possono essere considerati come una generalizzazione dei numeri complessi, o meglio un'estensione quadridimensionale degli stessi. Essi non hanno un vero e proprio significato fisico ma solo uno algebrico, essendo la rappresentazione dei quaternioni su quattro dimensioni.

I quaternioni sono costituiti da uno scalare s detto parte reale e da un vettore v detto parte immaginaria.

Generalmente è possibile scrivere il quaternione nella seguente forma:

$$q = s + xi + yj + zk = [s, v]$$

dove i, j, k sono i quaternioni unitari che possono essere intesi come versori unitari di un sistema vettoriale.

Una definizione alternativa dei quaternioni è quella denominata a quattro parametri, dove tre di loro indicano un versore unitario (la parte immaginaria) detto asse istantaneo di rotazione e uno rappresenta l'angolo di rotazione vero e proprio del corpo attorno a tale asse. In un sistema l'uso dei quaternioni al posto degli angoli di Eulero semplifica i calcoli quando vi è la necessità di fare trasformazioni di coordinate. Gli angoli di Eulero Roll, Pitch, Yaw vengono, tramite relazioni algebriche, trasformati in quaternioni i quali poi saranno molto più semplici da utilizzare, in quanto si elimina il problema dell'integrazione: basteranno infatti solamente semplici calcoli algebrici per ottenere la stima dell'assetto del sistema.

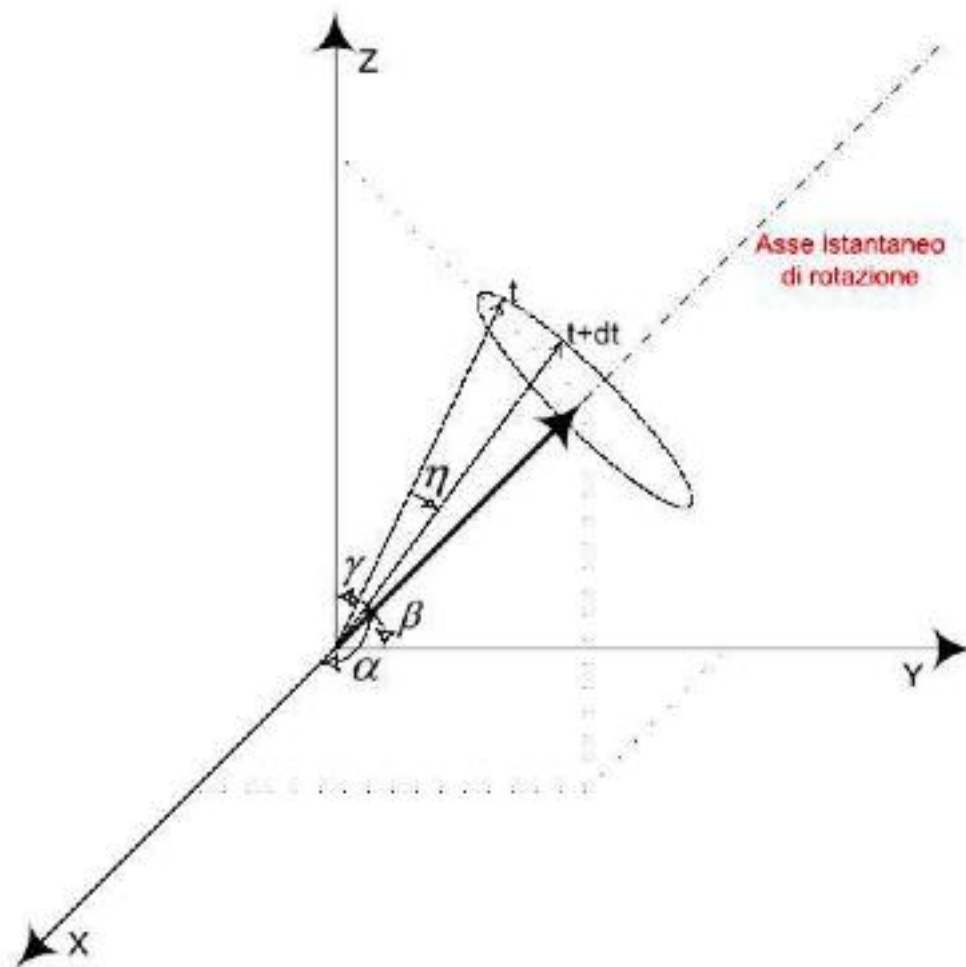


Figura 5.4: rappresentazione grafica del quaternioni a quattro parametri

5.5 Relazione tra gli angoli di Eulero e matrice dei cosini direttori

La matrice di rotazione totale è data dalla moltiplicazione delle seguenti tre matrici di rotazioni fondamentali:

$$R_z(\Psi) = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\Theta) = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & \sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \end{bmatrix}$$

$$R_x(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}$$

La moltiplicazione deve essere eseguita partendo dall'ultima rotazione per poi arrivare alla prima, in altre parole, se le rotazioni sono tre, si parte dalla terza matrice di rotazione, la si moltiplica per la seconda e poi per la prima. In questo modo si mettono in relazione gli angoli di Eulero con con la matrice dei cosini direttori:

$$\begin{aligned} R_{EUL} &= R_z(\varphi)R_y(\Theta)R_x(\Psi) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & \sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\varphi)\cos(\Theta)\cos(\Psi) & -\cos(\varphi)\cos(\Theta)\sin(\Psi) & \cos(\varphi)\sin(\Theta) \\ \sin(\varphi)\cos(\Theta)\cos(\Psi) & -\sin(\varphi)\cos(\Theta)\sin(\Psi) + \cos(\varphi)\cos(\Psi) & \sin(\varphi)\sin(\Theta) \\ -\sin(\Theta)\cos(\varphi) & \sin(\Theta)\sin(\Psi) & \cos(\Theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.6)$$

È naturalmente possibile fare il passaggio inverso, cioè mettere in relazione la matrice dei cosini direttori con gli angoli di Eulero.

Infatti la matrice R_{EUL} può essere invertita. Se si ipotizza che il $\sin(\Theta) > 0$, si ottiene:

$$\varphi = \arctan2(r_{23}, r_{13}) \quad (5.7)$$

$$\Psi = \arctan2(r_{32}, -r_{31}) \quad (5.8)$$

$$\Theta = \arctan2(\sqrt{r_{23}^2 + r_{13}^2}, r_{33}) \quad (5.9)$$

Per $\sin(\Theta) < 0$, si ottiene una seconda possibile soluzione:

$$\varphi = \arctan2(-r_{23}, -r_{13}) \quad (5.10)$$

$$\Psi = \arctan2(-r_{32}, r_{31}) \quad (5.11)$$

$$\Theta = \arctan2(-\sqrt{r_{23}^2 + r_{13}^2}, r_{33}) \quad (5.12)$$

Infine, se $\sin(\Theta) = 0$ (condizione verificabile ispezionando gli elementi r_{13}, r_{23}, r_{31} or r_{32} , si otterrà $\cos(\Theta) = 1$, se $\Theta = 0$, o $\cos(\Theta) = -1$ se $\Theta = \pi$, e questo può essere accertato dal segno di r_{33} .

Se ad esempio $\Theta = 0$, la matrice 5.6 diventerà:

$$R_{EUL} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi + \Psi) & -\sin(\varphi + \Psi) & 0 \\ \sin(\varphi + \Psi) & \cos(\varphi + \Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se invece $\Theta = \pi$, la matrice 5.6:

$$R_{EUL} = \begin{bmatrix} -\cos(\varphi - \Psi) & -\sin(\varphi - \Psi) & 0 \\ -\sin(\varphi - \Psi) & \cos(\varphi - \Psi) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Nel è possibile calcolare la somma o la differenza, a seconda dei casi, degli angoli φ e Ψ :

$$\varphi + \Psi = \arctan2(-r_{12}, r_{22}) \quad (5.13)$$

$$\varphi - \Psi = \arctan2(-r_{12}, r_{22}) \quad (5.14)$$

$$(5.15)$$

In altre parole è possibile scegliere arbitrariamente φ e poi determinare Ψ per soddisfare una delle condizioni di cui sopra, dipendenti dal valore di Θ .

In base alla sequenza di rotazioni la matrice dei cosini direttori cambia: essendo impossibile fare due rotazioni consecutive attorno allo stesso asse, le sequenze possibili sono quelle con tutto indici diversi (xyz, xzy, yxz, yzx, zxy, zyx) oppure quelle con due indici non consecutivi uguali (xzx, xyx, yxy, yzy, zxz, zyz). Com'è possibile vedere, le combinazioni possibili sono dodici, quindi le diverse matrici dei cosini direttori sono di conseguenza anche dodici.

Impostante è analizzare il caso della rotazione RPY, la cui matrice dei cosini direttori che si ottiene è la seguente:

$$R_{EUL} = R(\Psi)R(\Theta)R(\varphi) =$$

$$= \begin{bmatrix} c(\Psi)c(\Theta) & c(\Psi)s(\Theta)s(\varphi) + s(\Psi)c(\varphi) & -c(\Psi)s(\Theta)c(\varphi) + s(\Psi)s(\varphi) \\ -s(\Psi)c(\Theta) & -s(\Psi)s(\Theta)s(\varphi) + c(\Psi)c(\varphi) & s(\Psi)s(\Theta)c(\varphi) + c(\Psi)\sin(\varphi) \\ s(\Theta) & -c(\Theta)s(\varphi) & c(\Theta)c(\varphi) \end{bmatrix}$$

In questo caso gli angoli di Eulero saranno:

$$\varphi = \arctan2(r_{21}, r_{11}) \quad (5.16)$$

$$\Psi = \arctan2(r_{32}, -r_{33}) \quad (5.17)$$

$$\Theta = \arctan2(-r_{31}, \sqrt{(r_{23}^2 + r_{13}^2)}) \quad (5.18)$$

Validi per $-\pi/2 < \Theta < \pi/2$, mentre per $\pi/2 < \Theta < 3\pi/2$, gli angoli saranno:

$$\varphi = \arctan2(-r_{21}, -r_{11}) \quad (5.19)$$

$$\Psi = \arctan2(-r_{32}, r_{33}) \quad (5.20)$$

$$\Theta = \arctan2(-r_{31}, \sqrt{(r_{23}^2 + r_{13}^2)}) \quad (5.21)$$

5.6 Algoritmo sviluppato

Per determinare l'assetto del robot si è deciso di rappresentare l'orientazione sfruttando i coseni direttori (sez. 5.3). In tale rappresentazione c'è una ridondanza di valori: infatti se ne utilizzano 9 invece dei canonici 3.

Una volta calcolata l'orientazione, sfruttando le relazioni tra i coseni direttori e gli angoli di eulero, sarà possibile determinare l'assetto del robot (sez 5.5).

5.6.1 Teoria

L'orientazione relativa al global frame è ottenuta integrando la velocità angolare ottenuta dai giroscopi:

$$\omega_b(t) = (w_{bx}(t), w_{by}(t), w_{bz}(t))$$

Utilizzando i coseni direttori nella rappresentazione dell'orientazione nel body frame, come si è già visto precedentemente, rispetto al global frame è una matrice di rotazione 3x3, chiamata C, nella quale ogni colonna rappresenta la trasformazione di un asse del body frame nel global frame. Infatti dato un vettore v_b , definito nel body frame, è possibile trovare la sua rappresentazione nel global frame:

$$v_g = Cv_b$$

Naturalmente è possibile effettuare la trasformazione inversa:

$$v_b = C^T v_g$$

essendo che $C^{-1} = C^T$.

Per calcolare l'orientazione si deve tenere traccia della matrice C nel tempo. Se l'orientazione al tempo t è data da $C(t)$, la derivata è data da:

$$C'(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t + \delta t) - C(t)}{\delta t}$$

$C(t + \delta t)$ può essere scritta come prodotto di due matrici:

$$C(t + \delta t) = C(t)A(t)$$

dove $A(t)$ è la matrice di rotazione locale, cioè relativa al body frame, tra gli istanti t e $t + \delta t$.

Se $\delta\phi$, $\delta\Theta$, $\delta\psi$, sono le piccole rotazioni attraverso gli asse x,y e z del body frame, è possibile usare l'approssimazione ai piccoli angoli e si può scrivere quindi:

$$A(t) = I + \delta\Psi$$

dove:

$$\delta\Psi = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\psi & \delta\Theta \\ \delta\psi & 0 & -\delta\phi \\ -\delta\Theta & \delta\phi & 0 \end{bmatrix}$$

Quindi sfruttando le relazioni precedenti:

$$\begin{aligned}
 \dot{C}(t) &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t+\delta t) - C(t)}{\delta t} \\
 &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t)A(t) - C(t)}{\delta t} \\
 &= \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{C(t)(I + \delta\Psi) - C(t)}{\delta t} \\
 &= C(t) \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\Psi}{\delta t}
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

Quindi si arriva a definire:

$$\lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\Psi}{\delta t} = \Omega(t)$$

con

$$\Omega(t) = \begin{bmatrix} 0 & -w_{bz}(t) & w_{by}(t) \\ w_{bz}(t) & 0 & -w_{bz}(t) \\ -w_{by}(t) & w_{bx}(t) & 0 \end{bmatrix}$$

Quindi per calcolare l'orientazione si deve risolvere la seguente equazione differenziale:

$$\dot{C}(t) = C(t)\Omega(t) \tag{5.23}$$

la cui soluzione è

$$C(t) = C(0) \exp\left(\int_0^t \Omega(t)\delta t\right) \tag{5.24}$$

5.6.2 Discretizzazione dell'algoritmo

Per implementare l'algoritmo descritto nella sezione precedente si deve considerare che non si elabora un segnale continuo, ma un segnale discreto. Quindi è necessario discretizzare le equazioni precedenti. Inoltre sarà necessario scegliere anche in che modo approssimare l'integrale. Per tale applicazione è sufficiente scegliere l'approssimazione dell'integrale con un semplice rettangolo.

Consideriamo il periodo intercorso tra due successive letture $[t, t + \delta t]$. Allora l'equazione 5.23 può essere scritta:

$$C(t + \delta t) = C(t) \exp\left(\int_t^{t+\delta t} \Omega(t)\delta t\right) \tag{5.25}$$

Usando la regola del rettangolo:

$$\int_t^{t+\delta t} \Omega(t)\delta t = B$$

dove

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -w_{bz}\delta t & w_{by}\delta t \\ w_{bz}\delta t & 0 & -w_{bz}\delta t \\ -w_{by}\delta t & w_{bx}\delta t & 0 \end{bmatrix}$$

e $w_b = (w_{bx}, w_{by}, w_{bz})^T$ è il nuovo campione della velocità angolare disponibile. Sfruttando lo sviluppo in serie di Taylor fino al terzo ordines:

$$C(t + \delta t) = C(t) \left(I + B + \frac{B^2}{2} + \frac{B^3}{6} \right) \quad (5.26)$$

Utilizzando l'equazione 5.26 è possibile aggiornare l'orientazione ad ogni nuovo valore della velocità angolare ottenuto.

Una volta calcolata l'orinetazione, dalla matrice dei coseni direttori è possibile fornire i valori dell'assetto del robot applicando le regole viste nel paragrafo 5.5.

5.6.3 Implementazione

I giroscopi vengono montati in cima al robot, come si vede in figura 5.5 e 5.6. In questa configurazione si tengono sotto controllo le variazioni di velocità angolare lungo gli assi x e y, come si vede in figura 5.7. In mancanza di un terzo sensore per l'asse z, si ipotizza che non ci siano rotazioni in tale direzione (infatti la camminata a cui sarà successivamente applicato tale algoritmo prevede solamente un movimento rettilineo). In tale configurazione il sistema di riferimento body frame e global frame sono posizionati in cima al robot e quindi gli angoli calcolati sono da riferirsi a tale posizione del robot.

I dati ottenuti dai giroscopi, dopo che sono stati filtrati da un filtro passa basso FIR digitale, sono utilizzati per definire la matrice B definita nel precedente paragrafo. Tale matrice, come già detto, rappresenta la variazione di assetto locale. Attraverso il cambio di coordinate rappresentato dalla matrice dei coseni direttori si riportano tali dati ad una variazione globale dell'assetto del sistema robot.

Applicando la relazione tra gli angoli di Eulero e la matrice dei coseni direttori si calcolano gli angoli di pitch, roll e yaw.

Per sfruttare al massimo la velocità di acquisizione dei dati da parte del giroscopio, si è parallelizzato il sistema. In particolare si sono creati due thread:

- Un thread, chiamato (*thread_read_data*) si occupa di leggere i dati dai sensori e filtrarli;

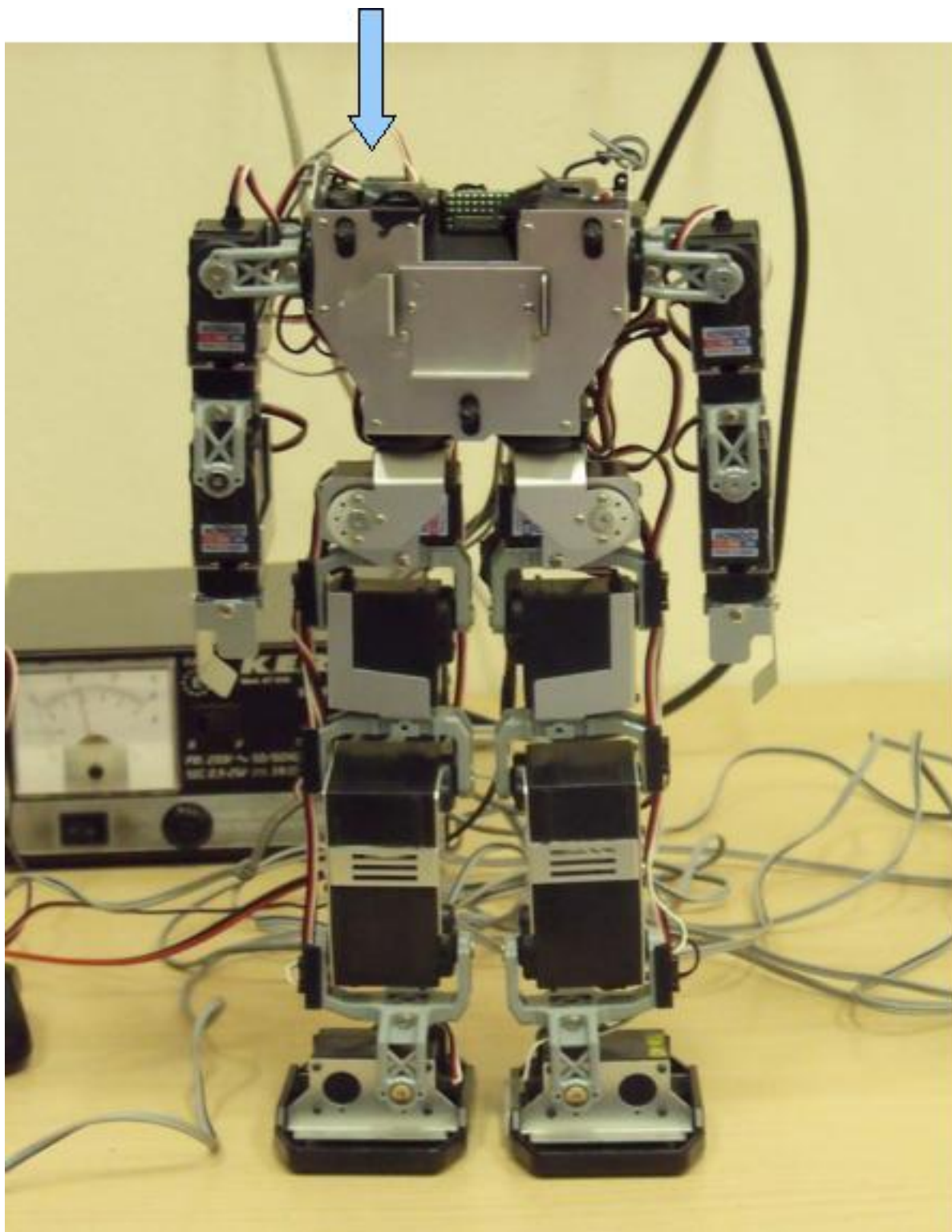


Figura 5.5: La freccia indica la posizione dei giroscopi

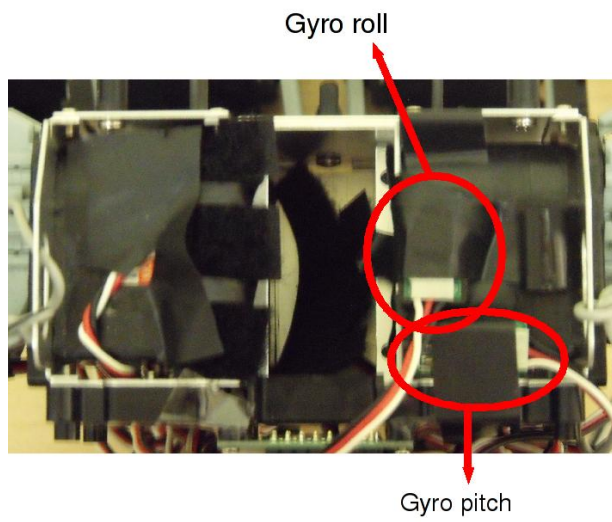


Figura 5.6: Posizionamento giroscopi

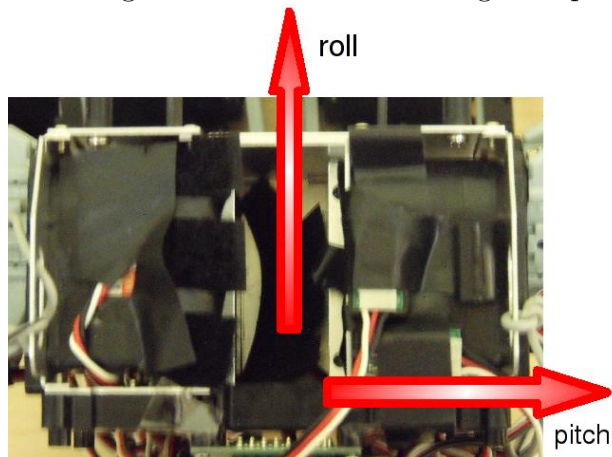


Figura 5.7: Posizionamento degli assi

- Un secondo thread, si occupa di aggiornare la matrice dei coseni direttori rappresentante l'orientazione del robot e determinare l'assetto del robot stessi

I due thread sono stati sincronizzati basandosi sul modello produttore-consumatore. In questo modo i dati acquisiti vengono elaborati con un ritardo medio di due campioni, ma si riesce a raddoppiare i campioni acquisiti e quindi si aumenta la precisione di calcolo dell'algoritmo.

5.6.4 Grafica del programma

L'algoritmo è stato realizzato totalmente in C++. Il cuore del programma si basa sulla classe chiamata Attitude la quale realizza l'algoritmo precedentemente descritto. Infatti è tale classe che si occupa di creare la matrice delle variazioni locali ogni volta che il thread per la lettura dei dati, ne rende disponibile di nuovi. Quindi viene aggiornata la matrice rappresentante l'orientazione e calcolati i nuovi angoli di Eulero.

Si è anche sviluppata una rappresentazione grafica dell'algoritmo: in particolare si è implementato una visualizzazione grafica degli angoli di eulero (fig. 5.8); inoltre si è realizzato un plotter grafico che mantiene lo storico dei dati (fig. 5.9). Tale

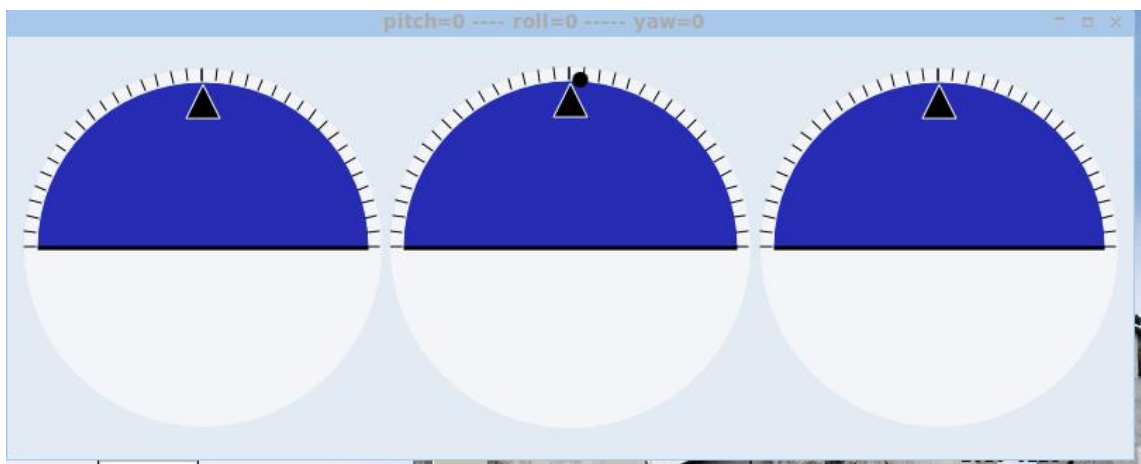


Figura 5.8: Visualizzazione grafica degli angoli di Eulero

software è stato realizzato sfruttando le librerie grafiche Qt (versione 4.6) ed una loro estensione, specifica per la visualizzazione grafica di dati (Qwt).

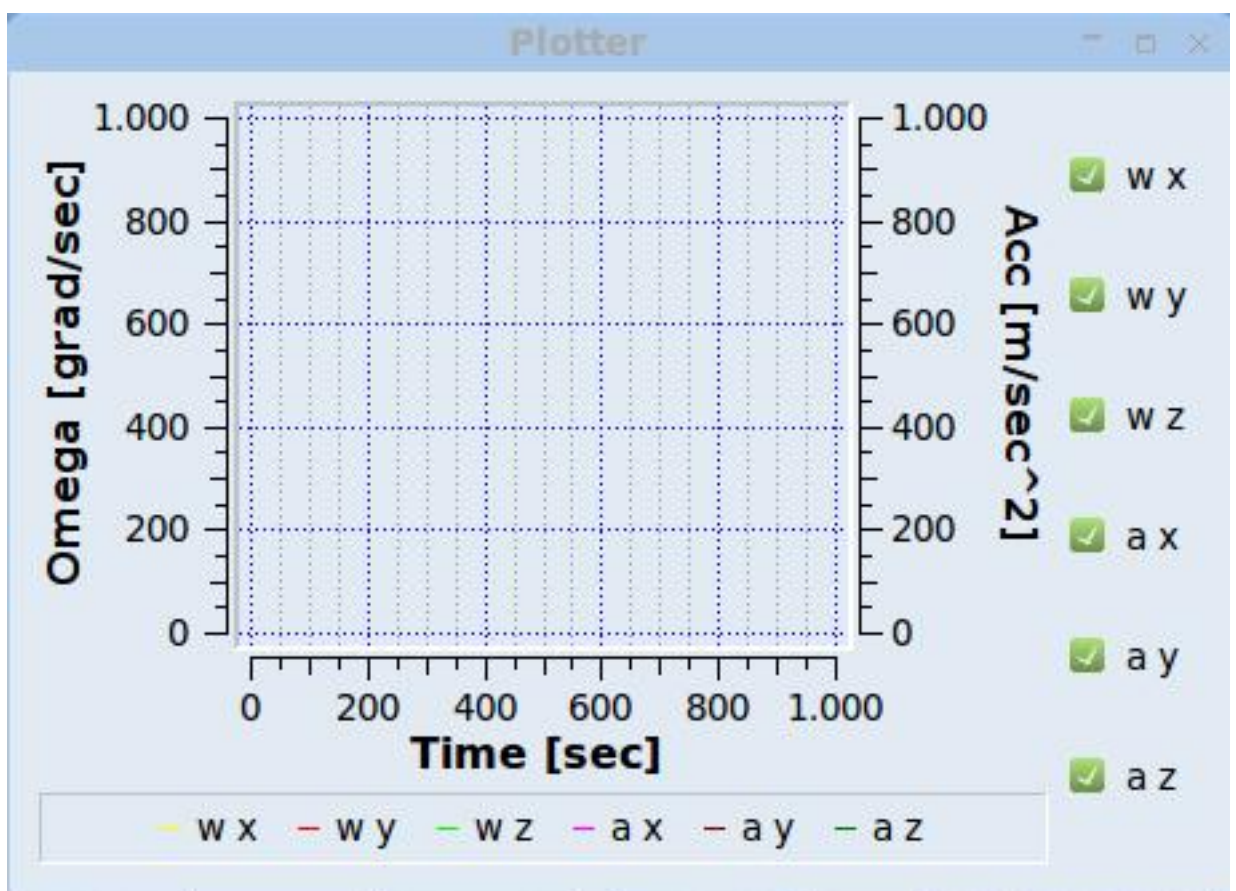


Figura 5.9: Storico dei dati

5.7 Esperimenti

Una volta progettato e quindi realizzato l'intero algoritmo si è proceduto a testarlo. La prova realizzata è stata la seguente: si sono montati a bordo i sensori e si è posizionato il robot in posizione eretta. Quindi si è ruotato il robot, avanti ed indietro, andando a rilevare quindi l'angolo di pitch. Per verificare la correttezza del calcolo effettuato dall'algoritmo, oltre ai giroscopi si è montato a bordo un accelerometro, utilizzato in tale caso come inclinometro: infatti l'unica accelerazione misurata in questa situazione è l'accelerazione di gravità, o meglio una sua componente. Dunque prendendo il valore misurato dall'accelerometro si calcola l'angolo di pitch nel seguente modo:

$$\sin^{-1}(g_x/g)$$

In figura 5.10 si possono vedere i dati provenienti dall'accelerometro. In figura

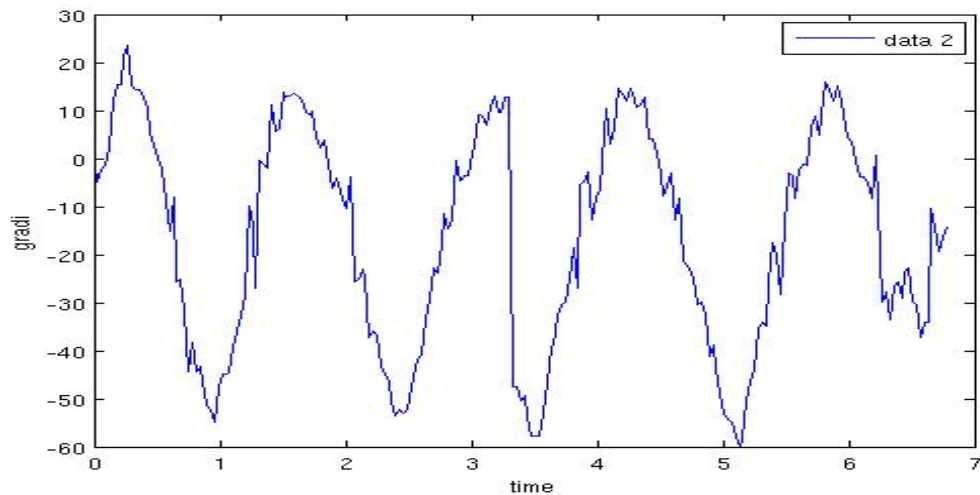


Figura 5.10: Dati dell'accelerometro

5.11 si vedono invece i dati ottenuti applicando l'algoritmo descritto nel precedente paragrafo, mentre in figure 5.12 si può osservare un confronto tra i due.

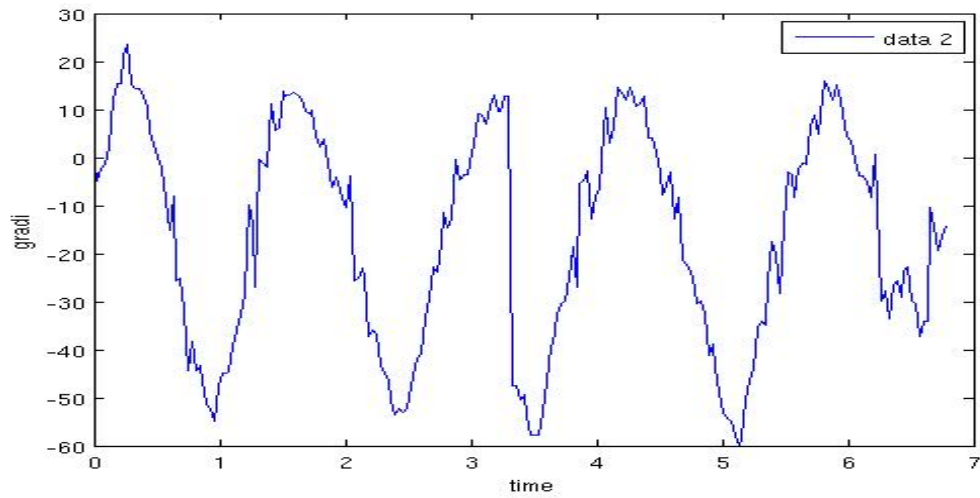


Figura 5.11: Dati del giroscopio

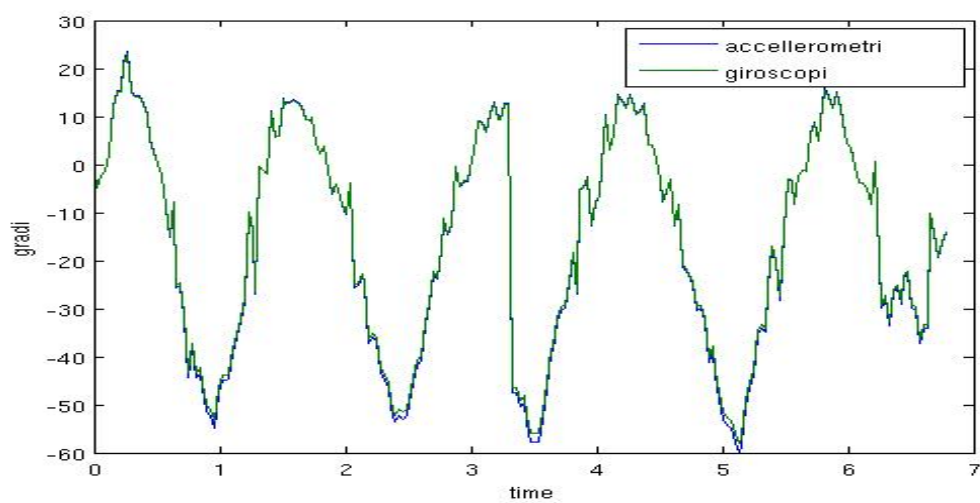


Figura 5.12: Confronto tra accelerometri e giroscopi

Capitolo 6

Locomozione Bipede

Nel corso degli anni sono stati pubblicati numerosi lavori sulla locomozione bipede. Sono stati proposti numerosi approcci al problema, sia dal punto di vista teorico, sia da quello sperimentale, con l'ideazione e la realizzazione di numerosi prototipi. In questo capitolo saranno riassunte le varie tecniche di controllo, insieme a una descrizione dei diversi robot realizzati.

6.1 Introduzione

Per avere un'idea della varietà dei progetti miranti alla locomozione bipede si può fare riferimento al Walking Machine Catalogue. Di fronte a una simile vastità viene da chiedersi quali siano i tratti fondamentali comuni alle macchine bipedi e in generale al processo di controllo che le governa. Un criterio di classificazione molto utile è quello in base alle caratteristiche dinamiche della camminata. I robot che camminano rimanendo sempre in equilibrio statico, ovvero mantenendo la proiezione del proprio centro di massa sempre all'interno dell'area di appoggio, sono compresi nella classe static walkers. La seconda categoria, chiamata dynamic walkers, comprende i sistemi robotici che durante il moto sono sempre in equilibrio dinamico, con la particolarità di avere piedi e cavallie attuati. I robot appartenenti all'ultima classe, i purely dynamic walkers, non hanno piedi di alcun tipo, quindi non possiedono configurazioni di equilibrio statico. Questi sono però in grado di raggiungere un equilibrio dinamico durante la locomozione. Un'ulteriore sezione di questo capitolo verrà dedicata a una particolare categoria di meccanismi puramente passivi, chia-

mata passive walkers, Sebbene questi non sia propriamente dei robot, sono tuttavia molto utili ai fini della comprensione della locomozione bipede.

6.2 Passive walkers

I passive walkers sono dei particolari meccanismi passivi, in grado di camminare su due gambe sfruttando solamente la forza di gravità mediante un'opportuna disposizione delle masse. Data la loro semplicità, questi sistemi costituiscono un buon mezzo per comprendere i tratti fondamentali della locomozione bipede.

Il pioniere nel campo del passive walkers è T. McGear [14][15], che ha pubblicato i primi studi nel 1990. L'idea di base è molto semplice e parte dal modello della rimless wheel. Nella figura 6.1 è rappresentata la wagon wheel ovvero la classica ruota dei carri.

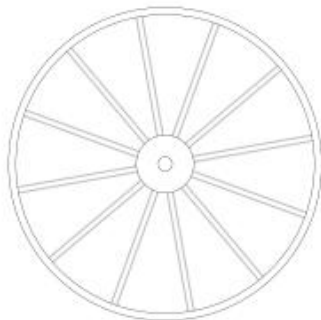


Figura 6.1: Wagon Wheel

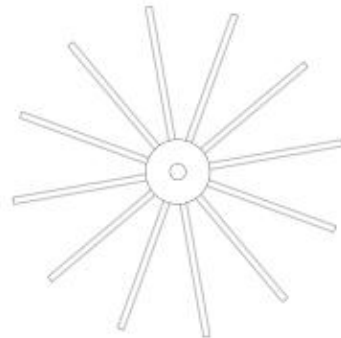


Figura 6.2: Rimless Wheel

Se si rimuovesse il cerchio esterno si ottiene la rimless wheel, rappresentata nella figura 6.2 i cui raggi possono essere visti come una serie di gambe. La wagon wheel può rotolare in maniera fluida su una superficie piana, la rimless wheel al contrario subirà una serie di urti che ne ridurranno progressivamente l'energia cinetica. Per calcolare questa perdita si faccia riferimento alla figura 6.3: nell'istante $t-$, che precede il cambio di supporto, la ruota è in contatto con il suolo nel punto $P-$. Nell'istante immediatamente successivo $t+$, il punto di contatto si è trasferito nel punto $P+$. I punti P rappresentano i centri istantanei di rotazione di tutto il sistema, il cui centro di massa si trova in O . Le velocità $v-$ e $v+$ rappresentano le velocità lineari del centro della ruota nei rispettivi istanti $t-$ e $t+$. A causa del cambio di

supporto istantaneo si vede che c'è una brusca variazione di velocità: questo è un fenomeno di urto, che qui viene ipotizzato anelastico. Calcoliamo allora il momento

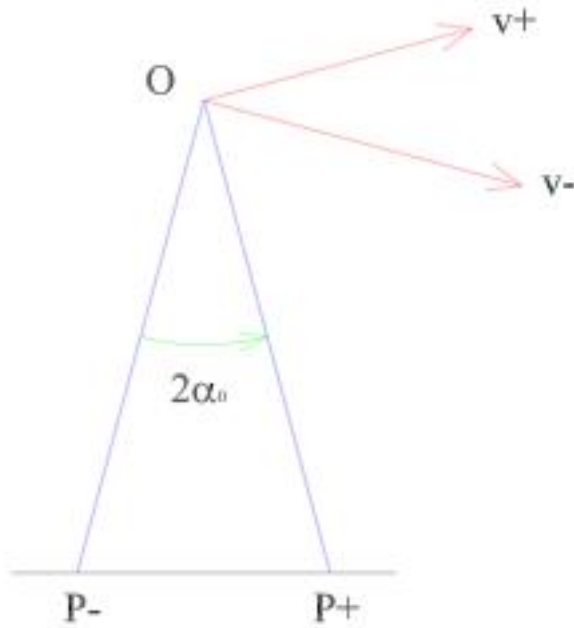


Figura 6.3: Cambio del centro di rotazione nella rimless wheel

della quantità di moto del sistema prima e dopo l'urto:

$$\begin{aligned} H^- &= (\cos 2\alpha_0 + r_{gyr}^2) m l^2 \Omega^- \\ H^+ &= (1 + r_{gyr}^2) m l^2 \Omega^+ \end{aligned}$$

Ω indica la velocità angolare, m la massa della ruota, l la lunghezza della gamba, r_{gyr} il raggio di girazione normalizzato secondo la lunghezza l ; ricordiamo che il raggio di girazione è definito dalla relazione $I = m * r_g^2$, dove I è il momento di inerzia e m la massa del sistema. $2\alpha_0$ indica l'angolo tra due gambe consecutive, come indicato in figura. I simboli (-) e (+) indicano la grandezza prima e dopo l'urto. Per il principio della conservazione della quantità di moto si possono confrontare queste due equazioni ricavando la variazione della velocità angolare:

$$\frac{\Omega^+}{\Omega^-} = \frac{(\cos 2\alpha_0 + r_{gyr}^2)}{1 + r_{gyr}^2} = \phi \quad (6.1)$$

dove ϕ indica il coefficiente di perdita per la velocità. Su una superficie piana la rimless wheel perderà molto rapidamente la sua energia cinetica fino a fermarsi. Ma se

la superficie è inclinata, l'energia persa potrà essere reintegrata dall'energia gravitazionale. Sorge però il problema della continuità del moto. Infatti il baricentro della rimless wheel percorrerà degli archi di circonferenza raccordati con delle cuspidi. Si avranno quindi brusche variazioni di velocità e accelerazione, oltre ad un'oscillazione dell'altezza del baricentro. Si deduce quindi che la rimless wheel non produce delle caratteristiche di moto ideali. Un risultato migliore si ottiene in questo modo: si

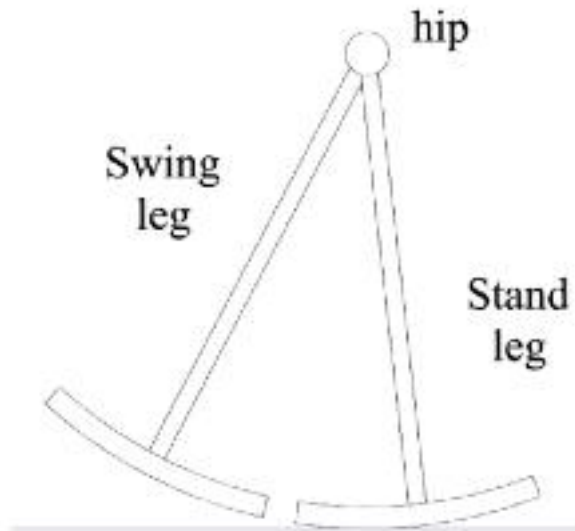


Figura 6.4: Cambio del centro di rotazione nella rimless wheel

prende la wagon wheel, si seziona il cerchione esterno in corrispondenza dell'angolo bisettore fra due raggi consecutivi, si eliminano tutti i raggi tranne due, e si rende mobile il collegamento fra questi tramite un giunco nel centro della ruota. Quello che si ottiene è il meccanismo illustrato nella figura 6.4. Tale meccanismo ha la stessa cinematica della wagon wheel quando uno dei due piedi è in contatto con il suolo; inoltre, ora le gambe possono ruotare una rispetto all'altra. Il problema è ora quello di portare la gamba che non è in contatto con il terreno in avanti, in modo da sostituire la gamba in contatto con il suolo al momento giusto. Se questo accade si realizza una locomozione bipede simile a quella della wagon wheel. Prima di proseguire è necessario soffermarsi sul concetto di stabilità applicato al campo della locomozione bipede. Quantitativamente parlando, un sistema è stabile se riesce sempre a raggiungere delle determinate condizioni di equilibrio partendo da un qualsiasi stato iniziale. Il sistema in esame, la wagon wheel modificata, presenta

un moto ciclico, che vede il ripetersi di due fasi: gamba destra a terra e sinistra in aria, e viceversa. L'evoluzione di ciascuna di queste fasi dipende unicamente delle condizioni iniziali, ed è evidente che queste corrispondono alle condizioni finali della fase precedente. Se queste variano si avranno fasi del moto diverse, ma se si riesce in qualche modo a fare sì che le condizioni iniziali siano ogni volta le stesse si ottiene allora un ciclo di fasi sempre identiche, che ripete all'infinito se stesso. Questo è quello che viene chiamato ciclo limite. Ma non basta: cosa succede se intervengono degli errori che allontanano il sistema da questa condizione? Può succedere che ci si allontani dal ciclo limite, oppure il sistema può automaticamente riportarsi in questa condizione. In quest'ultima situazione si assiste ad un'ulteriore caratteristica, la stabilità, e si parla allora di ciclo limite stabile. L'obiettivo è quindi quello di realizzare dei passive walkers che abbiano dei cicli limite stabili, in modo che questi possano essere fatti partire in un determinato intervallo di configurazioni iniziali, e possano autonomamente raggiungere il proprio ciclo limite. Il problema è stato risolto concentrando la maggior parte della massa in corrispondenza del centro della ruota (hip), in modo tale che la dinamica della swing leg non disturbi il moto complessivo del sistema, e individuando opportune condizioni iniziali tali da permettere a questa di effettuare il moto desiderato.

Nelle figure 6.5 e 6.6 sono illustrati due sistemi realizzati secondo tali principi e quindi capaci di camminare in modo stabile lungo dei piani inclinati. Dai vari esperimenti si è dedotto che la locomozione bipede è in generale efficiente dal punto di vista energetico, e produce un moto del centro di massa molto fluido, al limite perfettamente rettilineo, qualora questo coincida con l'hip. Il passo successivo sarà quello di aggiungere degli attuatori e dei controllori in modo tale da poter fornire energia al sistema in modo autonomo, senza dover ricorrere alla forza di gravità. Un interessante lavoro in questo senso è quello riportato in [16].

6.3 Static walkers

Il modo più semplice per realizzare una camminata bipede consiste nel fare in modo che il robot sia in ogni istante in equilibrio statico. Questo discorso ha senso solo se gli effetti dinamici sono tali da poter essere trascurati, in modo tale che si debba tenere conto esclusivamente delle forze gravitazionali. Se queste condizioni sono verificate,

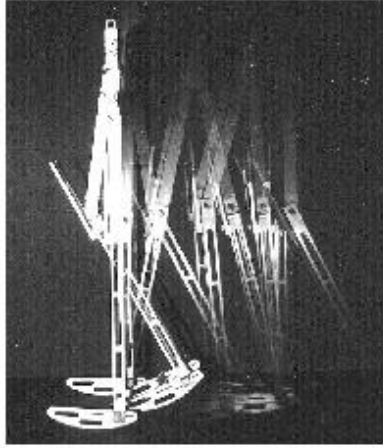


Figura 6.5: Passive walker Mc-Geer



Figura 6.6: Passive walker Collins

allora la strategia di controllo risulta effettivamente molto semplice. Nella figura 6.7 si vede il piede del robot che poggia a terra. Il dato fondamentale di cui si deve tenere conto è la proiezione sul suolo del baricentro dell'intero sistema, calcolabile con le relazioni:

$$x_{cog} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (6.2)$$

$$t_{cog} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (6.3)$$

$$(6.4)$$

dove x_i e y_i rappresentano le coordinate dei centri di massa dei vari link ed m_i la loro massa. x_{cog} e y_{cog} sono le coordinate del punto cercato. Nel caso in cui la proiezione del baricentro sia nella posizione P1, non si ha equilibrio statico; questo si ottiene invece nel caso in cui questa cada in P2. Se si riesce a pianificare i diversi movimenti necessari alla locomozione facendo rimanere la proiezione del baricentro sempre all'interno del poligono di appoggio, coincidente con l'area di contatto del piede con il suolo, si ottiene una serie di movimenti in cui il robot avanza senza mai cadere. Caratteristiche di questi robot sono i piedi grandi per aumentare l'area di appoggio, e i movimenti lenti per mantenere gli effetti dinamici trascurabili rispetto alle forze statiche. A fronte della semplicità del controllo, si hanno quindi andature

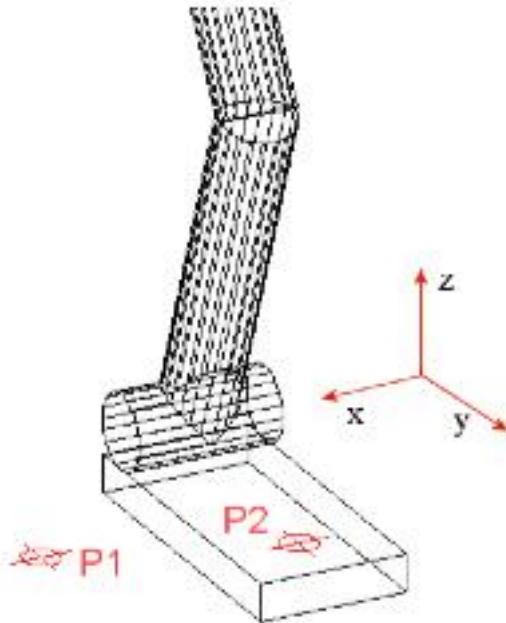


Figura 6.7: Diverse posizioni del baricentro

con velocità molto ridotte, motivo per cui si tende in genere ad orientarsi verso altri tipi di locomozione.

6.4 Dynamic walkers

Un sistema di locomozione deve garantire una certa velocità nei movimenti. Il problema principale degli static walkers risiede nella loro bassa velocità di avanzamento. L'unica maniera per incrementare tale velocità è quella di ricorrere a sistemi più complessi che sfruttino pienamente la dinamica. Una classe di robot che opera in questo modo è quella raggruppata sotto il nome di dynamic walkers. Durante la locomozione questi robot in genere non sono in equilibrio statico, bensì dinamico: questo è un'estensione del concetto di equilibrio, in quanto include nel calcolo, oltre alle forze gravitazionali, anche le forze di inerzia. Nella figura 6.7 si erano illustrate le condizioni per il sussistere dell'equilibrio statico, ovvero la proiezione del baricentro totale del sistema deve ricadere all'interno del poligono di appoggio. Per ottenere un equilibrio dinamico è necessario includere nel calcolo le forze di inerzia ricavate

con le equazioni della dinamica del robot; per il corpo i -esimo queste sono date da:

$$F_i = \begin{pmatrix} m_i x_i \\ m_i y_i \\ m_i z_i \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Queste sono le basi per il principio dello Zero Moment Point (ZMP) [17]: per un

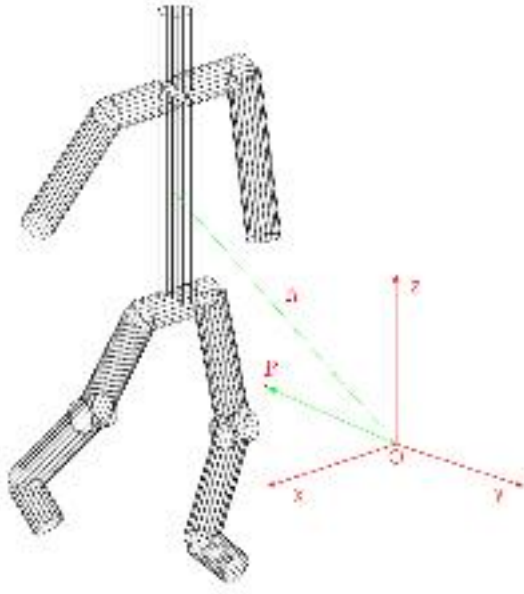


Figura 6.8: Calcolo dello ZMP

insieme di corpi rigidi (vedi figura 6.8) si possono scrivere le equazioni della dinamica nella forma

$$\sum_{i=1}^n m_i a_i = F \quad (6.6)$$

$$\sum_{i=1}^n ((r_i - P)m_i(a_i - g)) + T = 0 \quad (6.7)$$

equazioni che esprimono il bilancio delle forze e dei momenti agenti sul sistema. m_i è la massa del link i -esimo, $a_i - i$ il suo vettore accelerazione, F la risultante delle forze esterne. r_i è il vettore posizione del link, P il punto rispetto al quale vengono calcolati i momenti, g è il vettore accelerazione di gravità, e T il momento risultante delle forze esterne.

L'intero sistema si trova in equilibrio con l'applicazione nel punto P di una forza F e di una coppia T opportuni. Si può scegliere il punto P in maniera tale che

la coppia T sia nulla, e quindi il sistema risulti equilibrato semplicemente mediante l'applicazione di una forza F : in questo caso P si definisce appunto ZMP. In realtà di tali punti ne esistono infiniti, tutti allineati a formare una retta; ma nel campo della locomozione interessa solo il punto di intersezione di tale retta con il piano del suolo: l'obiettivo finale è infatti quello di far cadere lo ZMP all'interno dell'area del piede di appoggio, area che giace appunto sul piano del terreno. Per calcolare il punto in questione si impone la coordinate z di P uguale a zero:

$$O = [O_x O_y 0]^T \quad (6.8)$$

e si ricavano le coordinate dalla 6.7[17]:

$$O_x = x_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i (z_i - g_z) - \sum_{i=1}^n m_i z_i (x_i - g_x)}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i - g_z)} \quad (6.9)$$

$$O_y = y_{zmp} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i (z_i - g_z) - \sum_{i=1}^n m_i z_i (y_i - g_y)}{\sum_{i=1}^n m_i (z_i - g_z)} \quad (6.10)$$

dove g è il vettore accelerazione di gravità, che ponendo il piano xy come piano del suolo e l'asse z ortogonale e diretto verso l'alto assume la forma

$$g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -9.8 \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

È importante sottolineare che lo ZMP sul piano esiste stempres a meno che il denominatore comune alle espressioni di x_{zmp} e y_{zmp} non diventi nullo. Questo accade quando la componente \ddot{z} compensa esattamente l'accelerazione di gravità g : in questo caso lo ZMP si trova su uno dei punti all'infinito del piano xy .

Per poter applicare concretamente la camminata basata su ZMP è necessario disporre di un modello dinamico del robot. In letteratura si trovano numerosi modelli. Il più semplice è l'approssimazione della dinamica del robot attraverso un semplice pendolo inverso (fig 6.9). Un modello più complesso approssima il robot attraverso 3D Linear Inverted Pendulum Mode. Sulla base di questi modelli si calcola una stima della traiettoria dello zmp. Tale stima sarà poi controllata attraverso una misura diretta dello zmp. Questo è possibile attraverso lo sfruttamento di sensori di forza posizionati nel piede. Infatti l'obiettivo del controllore basato su zmp è mantenere tale punto all'interno della superficie d'appoggio del robot.

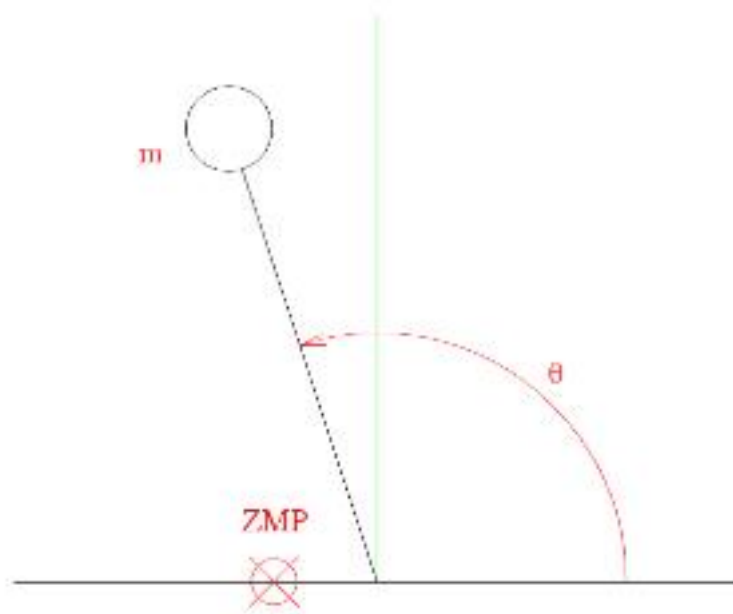


Figura 6.9: ZMP nel caso del pendolo inverso

6.5 Purely dynamic walkers

I dynamic walkers illustrati nella precedente sezione hanno prestazioni ottimali, ma costano però molto, in quanto devono essere equipaggiati con numerosi motori, di conseguenza anche la loro elettronica di controllo deve avere notevoli prestazioni. Per questo molti gruppi di ricerca si sono orientati verso strutture più semplici e quindi più economiche. È utile stabilire qual è la struttura minima che un robot bipede deve possedere. In figura 6.10 è illustrato un semplice robot a un grado di libertà, capace di far ruotare fra di loro le due gambe. Questa configurazione è insufficiente per implementare una camminata bipede, in quanto durante la fase di single support la swing leg urterebbe contro il suolo. Per questo motivo sono necessari due gradi di libertà aggiuntivi che permettano alle gambe di variare in qualche modo la loro lunghezza per poter effettuare correttamente la fase di swing forward. Il numero minimo di gradi di libertà è quindi 3. In genere comunque si opta per 4 gradi di libertà, in quanto si preferisce disporre due motori sull'asse dell'hip per controllare individualmente ciascuna delle gambe rispetto al corpo. La caratteristica principale di questo robot è quella di non avere piedi e caviglie attuati; anzi, spesso non sono affatto provvisti di piede, e il contatto con il suolo si realizza su una area approssimabile a puntiforme, È ovvio pertanto che un robot del genere non può,

in generale, avere configurazioni di equilibrio statico: possono però raggiungere un equilibrio dinamico durante la locomozione, da cui il nome di puramente dinamici. Per quanto riguarda la strategia di controllo, anche se si possono trovare numerosi

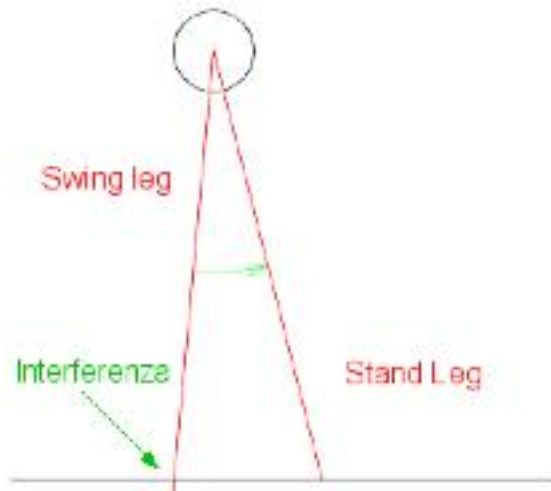


Figura 6.10: Configurazione minima per un robot bipede

approcci, tutti si basano per lo più, sul pendolo inverso. Tutti questi sistemi infatti hanno una dinamica oscillatoria nella fase del single support: il problema è controllare opportunamente questa dinamica. A questo proposito si possono utilizzare particolari semplificazioni del sistema, o indagare degli specifici cicli limite ai quali il sistema possa convergere. Furusho e Masubuchi utilizzano un modello ridotto del sistema che mette in evidenza due particolari autovalori, e quindi due modi: questi corrispondono in sostanza alla dinamica del pendolo inverso più la dinamica della swing leg. Il controllo si basa sull'assegnare riferimenti opportuni al modello ridotto [19][18].

R. Kato e M. Mori individuano, nel modello ridotto del sistema, la presenza di un ciclo limite di camminata stabile. La strategia di controllo si basa sull'individuazione delle condizioni necessarie alla convergenza a tale ciclo [20].

Molto diverso è l'approccio utilizzato da J. Pratt e G. Pratt. Essi non tengono conto del modello dinamico del sistema, ma implementano un controllo a basso livello degli attuatori, mirante a realizzare due fondamentali obiettivi: mantenere il corpo del robot a una certa altezza da terra, e contemporaneamente farlo traslare per ottenere la locomozione [21][22].

Molti lavori si basano esplicitamente sull'approssimazione della dinamica del sistema a quella di un pendolo inverso, applicando poi diverse strategie di controllo, a secondo del caso e degli obbiettivi specifici [25] [23] [24].

Capitolo 7

Camminata Realizzata

Come spiegato nel capitolo precedente riuscire a realizzare una camminata bipede stabile è una procedura molto complessa.

In questo caso si è scartato la possibilità di implementare una camminata dinamica principalmente per due motivi: il primo e più importante è il fatto che non si dispone della sensoristica necessaria, in particolare i sensori di forza necessaria alla misura diretta dello zmp; in secondo luogo l'impossibilità di ottenere un modello preciso della dinamica del robot.

Per cui per questo progetto di tesi si è realizzata una camminata statica, quindi non basata sulla dinamica del robot. La camminata risulterà più semplice da realizzare, ma sarà composta da movimenti più lenti, quindi la velocità di avanzamento sarà ridotta. Inoltre si limita la camminata solamente ad avanzare in una unica direzione rettilinea, quindi non si considerano variazioni di traiettoria.

La camminata sviluppata si basa sul lavoro realizzato e pubblicato da [26]. I movimenti dei giunti delle gambe sono calcolate con la tecnica della cinematica inversa partendo da una traiettoria predefinita e parametrizzata dei piedi. Per aiutare la stabilità della camminata i movimenti delle braccia sono sincronizzati con quelle delle gambe. Le traiettorie dei piedi e delle gambe sono parametriche.

7.1 Traiettoria delle gambe

Tutte le camminate bipedi hanno in comune il fatto che il movimento delle gambe si può suddividere in due fasi ben distinte:

- la prima fase è quando entrambi i piedi sono in contatto con il terreno e uno dei due spinge per l'avanzamento del corpo (ground phase)
- la seconda fase è quando l'altro piede viene spostato in avanti secondo una traiettoria prestabilita per preparare la fase successiva (air phase)

La gamba quando è in contatto con il terreno muove in senso contrario al senso di marcia, mentre durante lo spostamento del piede, il movimento accompagna la direzione del movimento della camminata (fig. 7.1). La traiettoria della gamba

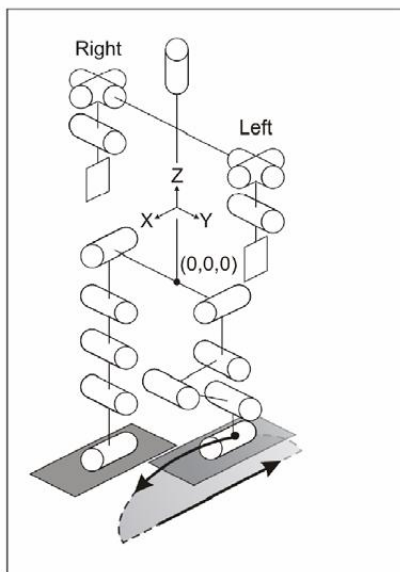


Figura 7.1: Movimento Piedi

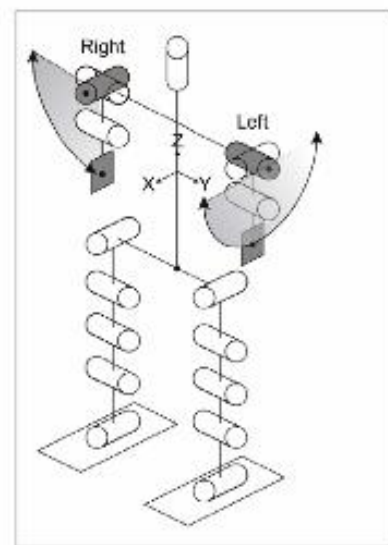


Figura 7.2: Movimento Braccia

come descritta precedentemente sarà determinata partendo dal movimento del piede sfruttando la cinematica inversa. Il movimento del piede può essere descritto da una traiettoria in 2 dimensioni. Per definire tale traiettoria si effettuano alcune assunzioni:

- il parametro inerente al tempo è normalizzato tra 0 e 1;
- la air phase si svolgerà nell'intervallo normalizzato $[0,0.5)$
- la ground phase nel restante intervallo
- il movimento del piede in aria si può scegliere arbitrariamente

Tra le varie traiettorie possibili da scegliere, come espone [26], si è scelta una traiettoria semi-ellittica:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos(2\pi t)\frac{S_l}{2} \\ \sin(2\pi t)S_h \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

dove S_h rappresenta l'altezza della falcata e S_l l'ampiezza della falcata stessa.

7.2 Movimento delle braccia

Il movimento delle braccia (fig. 7.2) è di aiuto nella stabilizzazione della camminata. Il movimento deve essere sincronizzato con quello delle gambe, per cui si utilizza lo stesso parametro di tempo per definire la traiettoria della braccia. La braccia si muoveranno in due piani distinti, cioè si avrà un movimento nel piano X-Z ed uno in Y-Z. L'angolo percorso dalle braccia nel piano X-Z è definito nel seguente modo:

$$w_{arm_x}(t) = \frac{\pi}{2}x_{arm_{max}}\sin(2\pi(t + \phi_x)) \quad (7.2)$$

Mentre il movimento nel piano Y-Z:

$$w_{arm_y}(t) = \frac{\pi}{2}y_{arm_{max}}\sin(2\pi(t + \phi_y) + 1) \quad (7.3)$$

Tale movimento è effettuato dagli attuatori che controllano il movimento delle spalle del robot. Applicando la cinematica inversa si determinano i movimenti dei giunti delle braccia del robot affinché effettuino tali movimenti.

7.3 Movimento del corpo

Per la descrizione del movimento del corpo si rimanda alla sezione in cui si descrive l'algoritmo di stabilizzazione della camminata.

Capitolo 8

Stabilizzazione della camminata

Obiettivo principale di tale tesi è riuscire ad implementare una camminata stabile e che sia in grado di rispondere a sollecitazioni esterne che la potrebbero destabilizzare e portare il robot ad una caduta. L'algoritmo che sarà esposto in tale capitolo è applicato alla camminata descritta precedentemente, quindi una camminata basata sul concetto di stabilità statica. Per tale camminata la stabilità è garantita da un predefinito movimento del bacino del robot che sposta il centro di massa verso la gamba di appoggio, in modo da permettere al robot di spostare in avanti la gamba secondo la traiettoria precedentemente definita. Tale tecnica però, anche se mantiene il robot stabile nel suo movimento (grazie all'elevata superficie di contatto data dalla forma dei piedi), non riesce a rispondere ad interferenze esterne.

La rilevazione delle interferenze esterne è affidata ai sensori inerziali, cioè giroscopi ed accelerometri. Conoscere tale parametro è importante in quanto permetterà di correggere la posizione del robot modificando la posizione dei suoi attuatori in retroazione. Per poter intervenire e correggere la posizione è necessario definire un parametro che permetta di capire quando l'assetto del robot definisce una posizione potenzialmente instabile. Per poter fare questo si definiranno dei limiti, per ogni asse, all'interno del quale il robot è sicuro essere stabile. Se i sensori rileveranno una fuoriuscita da tali intervalli si correggerà la posizione del robot, in quanto è segno di potenziale instabilità.

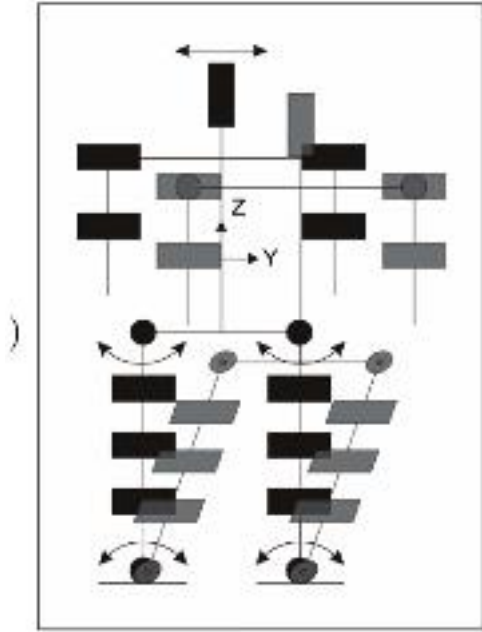


Figura 8.1: Schematizzazione del movimento laterale del centro di massa

8.1 Movimento base del bacino

Prima di esporre gli algoritmi in questa sezione si esporranno i movimenti base del busto per stabilizzare la camminata. Infatti il solo movimento dei piedi secondo una traiettoria semi-ellittica non è sufficiente a definire una completa camminata stabile. Per questo si sono definiti due movimenti del corpo del robot che hanno la funzione stabilizzante del movimento.

8.1.1 Movimento laterale

Il movimento laterale (fig. 8.1 e 8.2) del robot è dovuto al fatto che lo spostamento del centro di massa nella direzione del piede di appoggio aumenta la stabilità della camminata. Inoltre se il piede è abbastanza grande (come nel nostro caso), tale movimento permette il raggiungimento di una camminata statica. Tale movimento è sinusoidale (come fatto vedere da [26]) ed è sincronizzato con i restanti movimenti del robot tramite lo stesso parametro temporale. Il movimento laterale è definito:

$$w_{body_y}(t) = \frac{\pi}{2} y_{body_{max}} \sin(2\pi(t + \phi_{body_y})) \quad (8.1)$$

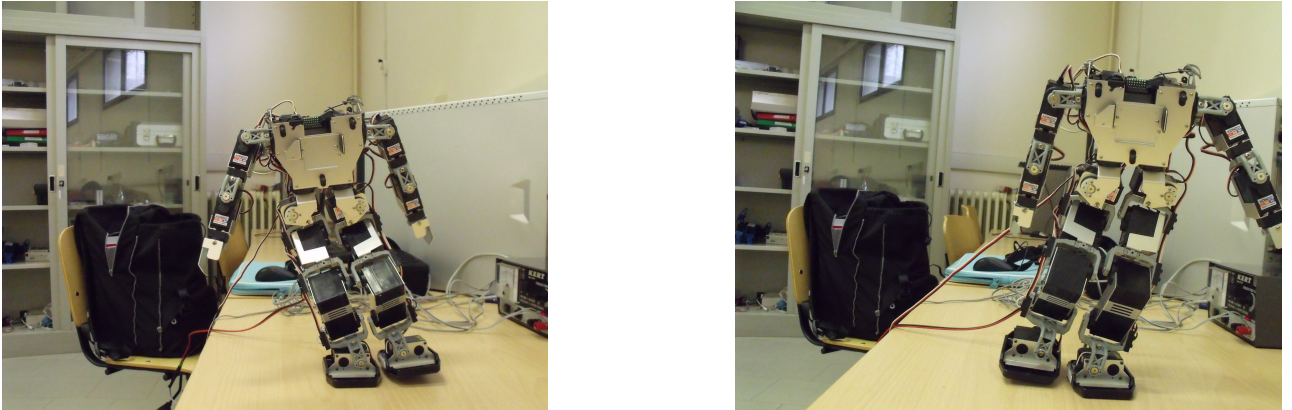


Figura 8.2: Movimento Laterale del robot

8.1.2 Movimento longitudinale

Per completezza è stato implementato anche un movimento del busto nella direzione della camminata. Il movimento è così definito:

$$w_{body_x}(t) = \frac{\pi}{4} x_{body_{max}} (1 + \sin(4\pi(t + \phi_{body_x}))) \quad (8.2)$$

8.2 Correzione della posizione

I movimenti precedentemente descritti permettono al robot di ottenere una camminata stabile, nel senso della stabilità statica in quanto la dinamica del robot non influenza il movimento dello stesso. Ma il robot non è in grado di rispondere ad eventuali sollecitazioni esterne, derivanti da malformazioni del terreno per esempio, che portano il robot a posizioni instabili. Affinchè il robot non si sbilanci a causa di tali sollecitazioni è necessario correggere l'assetto del robot. Quindi come, già accennato in precedenza, si utilizzano i sensori inerziali per individuare tali situazioni potenzialmente instabili.

8.2.1 Calcolo dell'assetto del robot

Per calcolare l'assetto del robot verranno utilizzati solamente i giroscopi.

Per quanto riguarda l'utilizzo dei giroscopi l'assetto del robot viene calcolato nel modo descritto nel capitolo 5, cioè attraverso l'algoritmo noto come integration strapdown. È da far notare che per integrare il calcolo dell'assetto con il movimento

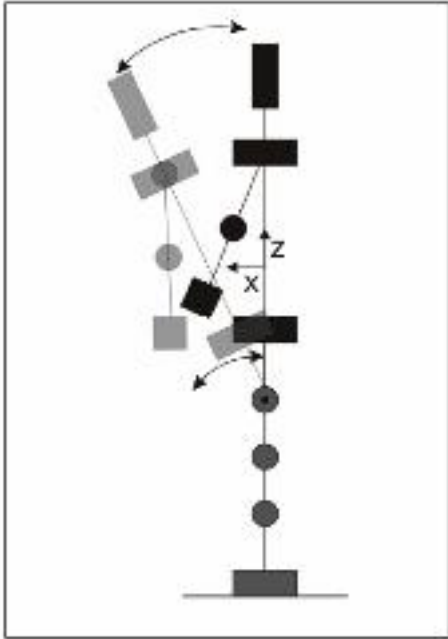


Figura 8.3: Schematizzazione movimento longitudinale

del robot si sono riscontrate notevoli difficoltà. Infatti, anche se la scheda di controllo permette la gestione in parallelo del movimento degli attuatori e della lettura dei sensori, il problema è che tali compiti sono gestiti tramite la stessa porta seriale (in particolare tramite la stessa porta USB). Infatti bisogna fare in modo che il comando del movimento del robot e per la lettura dei dati non siano inviati simultaneamente alla scheda di controllo: infatti se avvenisse il microchip della scheda non sarebbe in grado di gestire tale eventualità in quanto i comandi andrebbero a sovrapporsi. Per risolvere tale problema inizialmente si era pensato di utilizzare due thread e di sincronizzarli per l'accesso alla porta USB: se un thread stava ricevendo o inviando dati l'altro aspettava. Tale soluzione si è rivelata un fallimento in quanto si è ottenuto una camminata non più fluida nei movimenti, ma a scatto: infatti capitava spesso che il thread che gestisce il movimento rimanesse sospeso per un periodo troppo lungo per ottenere un corretto movimento. La soluzione finale prevede quindi di utilizzare sempre un thread per la lettura ed uno per il movimento del robot, ma con una diversa metodologia di sincronizzazione. Infatti sarà il thread del movimento ad avviare il thread di lettura dei dati ed ad interromperlo quando, dopo aver calcolato la traiettoria di gambe e braccia, deve inviare la posizione degli attuatori del robot, ed a riavviarlo subito dopo. Questa è stata la soluzione che

meglio permette di avere una camminata fluida e una buona quantità di dati per l'algoritmo di calcolo dell'orientazione del robot.

Per tale progetto di tesi, oltre ai giroscopi, inizialmente si era pensato di poter utilizzare anche gli accelerometri per determinare gli angoli di pitch e di roll. Infatti gli accelerometri misurando accelerazione, misurano anche l'accelerazione di gravità. Quindi tali sensori possono essere anche utilizzati come inclinometri. Questa tecnica funziona sicuramente se il robot non si muove: infatti il movimento del robot provoca una accelerazione che si va a sommare all'accelerazione di gravità, e quindi il dato dell'angolo ottenuto non è più affidabile. Per risolvere tale problema [3] mostra come approssimare l'accelerazione come un filtro del primo ordine, in modo da isolare l'accelerazione di gravità. Ma si è deciso di utilizzare solamente i giroscopi in quanto hanno fornito ottimi risultati.

Una volta determinato l'assetto del robot è necessario determinare se si deve aggiustare la posizione del robot. Tale tecnica viene spiegata nel successivo paragrafo.

8.2.2 Individuazione dell'instabilità

Per individuare quando l'assetto del robot potrebbe diventare instabile è necessario sapere all'interno di quale range di valori il robot rimane stabile.

Tale range deve essere determinato sia per l'angolo di pitch che per l'angolo di roll (l'angolo di yaw non viene considerato in quanto non sono previsti movimenti rotazionali di questo tipo nella camminata). Per determinare tale parametro si è proceduto in tale modo:

1. Si sono montati a bordo del robot i sensori inerziali
2. Si fa camminare il robot con la camminata base rilevando i dati
3. Si graficano i dati

Tale procedura è stata iterata più volte. A questo punto si sono graficati i dati assieme e si è individuato un limite massimo e minimo assoluto.

8.2.3 Aggiustamento dell'assetto

Per aggiustare l'assetto è necessario distinguere tra due casi:

1. Un eccessivo angolo di pitch
2. Un eccessivo angolo di roll

Infatti le politiche di intervento coinvolgono attuatori differenti per correggere l'assetto.

Nel primo caso, cioè un eccessivo angolo di pitch, la politica di intervento seguita è la seguente: si misura l'eccesso rispetto al termine massimo o minimo definito dal range. Nel caso di un eccesso rispetto al massimo si interviene sottraendo al valore degli attuatori B e E (vedi fig. 8.4) la differenza tra il valore misurato e quello in eccesso: questo intervento fa sì che il busto del robot effettui una rotazione nella direzione opposta alla sollecitazione che lo aveva inclinato in modo eccessivo. Invece nel caso di un eccesso rispetto al minimo si interviene nel medesimo modo, tenendo conto di alcune differenze: si calcola la differenza tra il valore rilevato e il valore minimo (presi in valore assoluto), e in questo caso tale valore viene aggiunto a quello degli attuatori B e E. Infatti la sollecitazione in questo caso è avvenuta in direzione opposta rispetto al caso precedente.

L'intervento rispetto ad un eccesso roll, è più complesso rispetto al primo caso esposto in quanto coinvolge un movimento che è alla base della stabilità del robot. Infatti inizialmente si era pensato di intervenire esclusivamente sugli attuatori che controllano il movimento laterale del bacino (A e D, fig. 8.4). Ma modificando solamente tali attuatori non si riesce a spostare il centro di massa del robot in modo sufficiente da evitare la caduta. Per cui è necessario intervenire anche sugli attuatori della caviglia (C ed E, fig. 8.4), in modo da ottenere un movimento uniforme di tutta la gamba del robot. Si determina sempre il valore assoluto della differenza tra l'angolo di roll misurato ed i limiti massimi e minimi. Tale valore calcolato è il parametro di modifica degli attuatori.

8.3 Risultati dei test

Purtroppo non è stato possibile realizzare una serie di test completa in quanto i giroscopi si sono rotti. Infatti si è osservato attraverso un oscilloscopio, che la tensione analogica a riposo fornita dai giroscopi, subisce forti variazioni: questo, molto

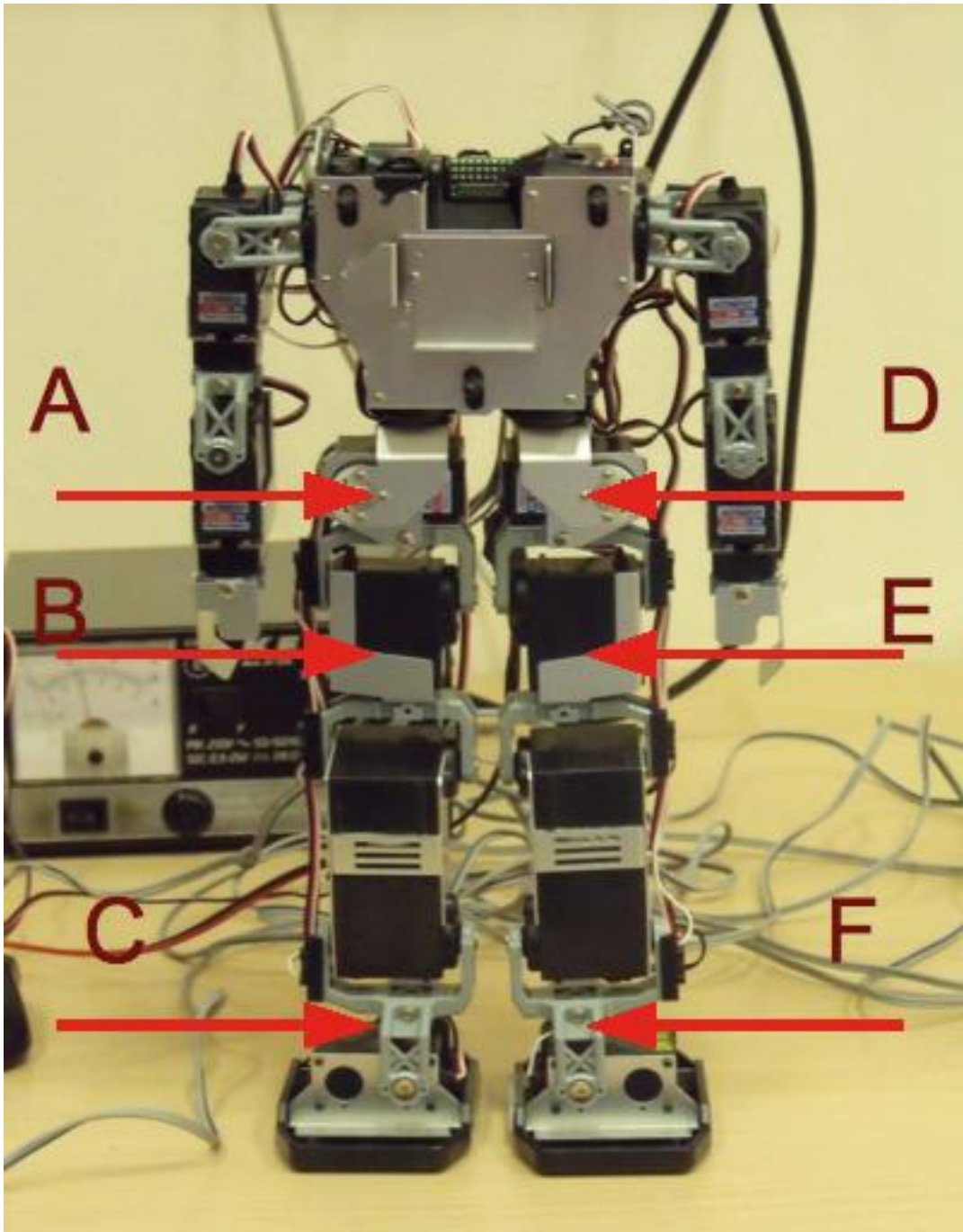


Figura 8.4: Motori usati per la correzione dell'assetto

probabilmente, è da imputare ad un malfunzionamento del cristallo piezometrico che rileva la velocità angolare. Questo è un problema che causa un malfunzionamento del sistema per la determinazione dell'assetto del robot: infatti gli angoli di pitch e roll calcolati subiscono una forte deriva. Per cui il controllore realizzato non funziona. Dai test effettuati si possono trarre comunque delle conclusioni finali di tipo qualitativo.

La camminata realizzata con la correzione funzionante, risulta ridurre le oscillazioni del busto del robot.

Invece per quanto riguarda il mantenimento del robot stabile durante il suo moto, il controllore funziona nella maggioranza dei casi. Infatti se la sollecitazione esterna al sistema risulta essere molto violenta, le correzioni messe in atto non sono sufficienti a mantenere il robot in equilibrio. Questo è dovuto ad una coppia non elevata dei motori dei giunti del robot, ed a un ritardo nella rilevazione della potenziale instabilità.

Capitolo 9

Conclusione e Sviluppi Futuri

Purtroppo, come già accennato nel capitolo precedente, i giroscopi utilizzati per questo progetto di tesi, si sono rotti e quindi non è stato possibile sviluppare una serie di test completa, per quanto riguarda l'algoritmo di stabilizzazione della camminata. Dagli esperimenti effettuati si può concludere che il sistema sviluppato per il calcolo dell'assetto del robot è un sistema efficiente e preciso. Sicuramente le sue prestazioni possono essere migliorate se si utilizzassero i quaternioni invece dei coseni direttori. I giroscopi utilizzati offrono prestazioni sufficienti per ciò che si è voluto realizzare. Il problema che si è riscontrato per l'utilizzo di tale sensori, è il fatto di interagire con essi attraverso la stessa scheda che controlla il movimento del robot. Infatti se la scheda permette un certo parallelismo, il collo di bottiglia si riscontra nel fatto che è necessario gestire l'invio dei comandi alla scheda per evitare che si sovrappongano e diventi impossibili elaborarli. Tale problema si riscontra solamente se si vuole applicare il sistema sviluppato alla camminata: in questo caso per risolverlo si deve accettare il fatto che si ottengono meno campioni rispetto al caso in cui si effettuasse solamente la lettura dei dati.

Per quanto riguarda invece la camminata implementata si può tranquillamente concludere che, per una camminata statica, risulta avere un movimento piuttosto fluido. Inoltre si è ottenuto lo scopo che ci si era prefissi, cioè la realizzazione di una camminata bipede per robot umanoidi che imitasse le movenze di una camminata bipede umana. Ma tale camminata, se soggetta a sollecitazioni esterne, potrebbe perdere la sua stabilità. Per questo motivo si è implementato un algoritmo, che integra la camminata, che riesca a reagire a tale sollecitazioni.

Tra le varie metodologie di reazione a tali sollecitazioni esterne, si è scelto di implementare una strategia di controllo in retroazione, cioè l'aggiustamento dell'assetto del robot dopo che si è calcolato la posizione degli attuatori e tramite i sensori inerziali si è rilevato la potenziale instabilità. In tali casi il sistema sviluppato non risulta essere sempre efficiente. Infatti se la sollecitazione è violenta il robot non è in grado di rispondere in tempo reale. Questo è dovuto principalmente a due fattori: il primo riguarda la forza o coppia dei motori che non risulta essere sufficiente; il secondo motivo è da ricercarsi in una mancanza dell'algoritmo di determinazione dell'assetto. Infatti l'algoritmo non riesce a seguire tali movimenti violenti del robot e quindi lo stesso non è in grado di eseguire le contromisure necessarie.

La stabilizzazione della camminata ha come fine ultimo il suo impiego in robot che utilizzano una videocamera montata sul busto. Infatti il sistema implementato ha il pregio di riuscire a limitare le oscillazioni del busto, quindi permetterebbe la stabilizzazione del flusso video proveniente dalla telecamera.

Bibliografia

- [1] Paolo Barbero. *Simulazione del sistema di posizionamento di un autoveicolo*. Politecnico di Torino, Tesi ,2006.
- [2] Oliver J. Woodman, *An Introduction to inertial navigation*. University of Cambridge, Technical Report numero 696, Agosto 2007.
- [3] H. J. Luinge, P. H. Veltink, *Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscope and accelerometers*. University of Twente, 2004.
- [4] J. E. Bortz, *A new mathematical formulation for strapdown inertial navigation*, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 7, pp 61-66, 2007.
- [5] P. Kulvanit, B. Srisuwan, K. Siramee, A. Boonprakob, D. Laowattana *Team KMUTT: Team Description Paper* King Mongkut's University of Technology Thonburi, Institute of Filed Robotics (FIBO)
- [6] M. Vukobratovic and B. Borovac, *Zero Moment Point - thirty five years of its life* , Int. Journal of Humanoide Robotics, pp. 131-147, 2003
- [7] Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kazuhito Yok oiand Hirohisa Hiruka wa *The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation*, National Institute of Advance Industrial Scienze and Technology (AIST)
- [8] Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kiyoshi Fujiwara, Kensuke Harada, Kazuhito Yokoi, Hirohisa Hirukawa, *Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point*, National Institute of Advance Industrial Scienze and Technology (AIST)

- [9] Hendreik Burgdirger, Fabian Ruhle, *Project Documentation: Stabilization of Robonova*, Interdisciplinary Center for Scientific Computing Ruprecht-Karls University Heidelberg, 2007
- [10] Jacky Baltes, Sara McGrath, John Anderso, *Active Balacing Using Gyroscopes for a small Humanoid Robot*, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada
- [11] Odest Chadwicke Jenkis, Pawel Wrotek, Morgan McGuire, *Dynamic Humanoid Balance throught Inertial Control*, Departure of Computer Science, Brown University, Computer Science Department, Williamns College
- [12] Reimund Renner, Sven Behnke, *Instability Detection and Fall Avoidance for a Humanoide using Attitude Sensor and Reflex*, University of Freiburg, German.
- [13] Felix Faber, Sven Behnke, *Stochastic Optimization of Bipedal Walking using Gyro Feednack and Phase Resetting*, University of Freiburg, German.
- [14] Tad McGeer, *Passive dynamic walking*, *The International Journal of Robotics* , Research 9 (1990), no. 2, 62
- [15] *Passive walking with knees*, *1990 IEEE Robotics & Automation* , Conference (1990), 1640+
- [16] Atsushi Imadu Toru Shimada Kyosuke Ono, Ryutaro Takahashi, *Self-excitation control for biped walking mechanism*, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2000), 1143+
- [17] D. Juricic M. Vukobratovic, *Contribution to the synthesis of biped gait*, *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering* (1969) , no. 1, 1–6
- [18] M. Masubuchi J. Furusho, *Control of a dynamical biped locomotion system for steady walking*, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 108 (1986), 111+
- [19] *A theoretical ly motivated reduced order model for the control of dynamic biped locomotion*, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 109 (1987), 155+

- [20] M.Mori R.Katoh, *Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory*, Automatica 20 (1984), no. 4, 405
- [21] Gill Pratt Jerry Pratt, *Intuitive control of a planar bipedal walking robot*, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation (1998), 2014+
- [22] Gill Pratt Jerry Pratt, Peter Dilworth, *Virtual model control of a bipedal walking robot*, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics & Automation (1997), 193+
- [23] *Experimental study of biped dynamic walking in the linear inverted pendulum mode*, IEEE International Conference on Robotics & Automation (1995), 2885+
- [24] Kazuo Tani Shuuji Kajita, *Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain*, Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics & Automation (1991), 1405+
- [25] Kyoung D. Kim Jong H. Park, *Biped robot walking using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control*, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation (1998), 3526+
- [26] Matthias Hebbel, Ralf Kosse, Walter Nistico, *Modeling and Learning Walking Gaits of Biped Robots*, University Dortmund