

POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Progetto di intelligenza artificiale e robotica



SISTEMA DI CONTROLLO  
PER UN ROBOT A BILANCIAMENTO.

Relatore: prof. Andrea Bonarini

Tesi di Laurea Triennale di:

Riccardo Chiappa

Matricola 672223

Anno accademico 2007/2008

## RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare con tutto il mio cuore le persone che mi hanno aiutato a raggiungere questo traguardo,.

In particolare ringrazio i miei genitori, mia sorella, tutto il parentado e la mia fidanzata, che mi hanno costantemente incoraggiato nei momenti difficili esultando insieme a me nei momenti felici e incoraggiandomi nelle avversità. Spero di raggiungere in futuro numerosi altri traguardi come questo nella mia vita, con lo stesso entusiasmo con cui sono arrivato a questa ambita meta, sempre affiancato dalla vostra affettuosa presenza.

Come non ringraziare tutti gli Amici dell'Università e in modo particolare imiei *"Compagni di corso e di laboratorio"* con i quali ho condiviso più da vicino questi ultimi anni di intenso studio ma anche di piacevoli svaghi, in particolare Liso, Cela e il Cice sempre vicini per tutto il percorso formativo. Ora, più di tutti, possono comprendere il mio grado di soddisfazione.

Uno speciale ringraziamento al Professor Bonarini per avermi seguito durante lo svolgimento del lavoro con consigli e confronti che mi hanno aiutato ad intraprendere, ogni volta, le scelte più appropriate.

## SOMMARIO

La tesi in oggetto tratta lo studio di un sistema di controllo di un robot a bilanciamento, il quale effettuando azioni di controllo su di una coppia di ruote poste sul medesimo asse deve mantenersi in equilibrio.

Lo scopo della tesi è realizzare una scheda di controllo che possa acquisire la posizione del robot attraverso un accelerometro a due assi, un giroscopio, gli encoder ottici posti sui motori e attuare una reazione attraverso una coppia di motori.

Nel progetto si è cercato di creare una piattaforma funzionale ed affidabile sulla quale far evolvere il progetto, infatti questa tesi non si pone come un punto di arrivo del progetto, ma una tappa intermedia che va ad esaurire la progettazione e realizzazione delle componenti elettroniche, ma lascia spazio a ulteriori sviluppi meccanici e software.

# INDICE

1	Introduzione .....	1
1.1	Obbiettivi.....	1
1.2	Struttura della tesi .....	1
2	Stato dell'arte .....	3
3	Il problema meccanico .....	8
3.1	Il pendolo inverso.....	8
3.1.1	Equazioni del moto .....	9
3.1.2	Il pendolo su un carrello.....	9
3.2	La meccanica di Tilty .....	10
3.2.1	Particolari costruttivi .....	10
3.2.2	Analisi fisica .....	12
3.2.3	Le forze sull'accelerometro.....	14
4	Il problema elettronico .....	16
4.1	L'Airboard.....	16
4.2	Tilty board .....	17
4.2.1	Analisi circuitale .....	17
5	Il problema di controllo .....	24
5.1	Stima dell'angolo.....	24
5.1.1	Metodo diretto.....	25
5.1.2	Metodo diretto su unico asse .....	25
5.1.3	Metodo diretto con filtro passa basso.....	26
5.1.4	Metodo ad unico sensore.....	27
5.1.5	Filtro di Kalman.....	27
5.1.6	Filtro complementare .....	28
5.2	Il controllore .....	29
6	Realizzazioni sperimentali.....	31
6.1	Test a ruote bloccate.....	31
7	Conclusioni e sviluppi futuri .....	34

7.1	Conclusioni.....	34
7.2	Sviluppi futuri.....	35
8	Bibliografia.....	37

# Introduzione

## 1.1 Obbiettivi

La tesi in oggetto riguarda lo sviluppo del sistema di controllo di un robot a bilanciamento, chiamato Tilty, il quale sfruttando la teoria del pendolo inverso deve mantenersi in equilibrio effettuando azioni di controllo su di una coppia di ruote poste sul medesimo asse. Il lavoro svolto parte dall'hardware di controllo, i sensori di riferimento e le considerazioni ottenute in merito all'analisi del lavoro di modellizzazione e simulazione effettuato in una tesi precedente. I sensori disponibili sono un accelerometro a due assi, un accelerometro angolare e due encoder ottici posti in prossimità delle ruote.

La scheda di controllo ereditata dalla tesi precedente è stata analizzata tentando di effettuare degli interventi volti a ridurre i disturbi sui segnali e poi sostituita con una nuova elaborata sulla base dell'esperienza svolta con la precedente, introducendo dei preamplificatori per i segnali più critici e migliorando l'approccio con la gestione dei pwm.

E' stato testato il sistema di *controllo ottimo* precedentemente implementato, mostrando i limiti della modellizzazione precedente, e si è scelto di sostituire questo approccio con un filtro complementare e un controllore lineare.

Al termine della tesi si è raggiunto l'obiettivo posto, il robot raggiunge la stabilità, seppur mantenendo piccole oscillazioni intorno alla verticale.

## 1.2 Struttura della tesi

Nel capitolo due è presentato lo *stato dell'arte* con riferimenti ad articoli correlati all'area generale in cui è stato svolto il lavoro.

Nel capitolo tre si illustra la meccanica del progetto, esponendo la *struttura* del robot, *l'analisi teorica* del sistema fisico di un *pendolo inverso*, prima nel caso classico su un carrello e poi nella configurazione del robot in oggetto.

Nel capitolo quattro si descrive l'elettronica del sistema, presentando e analizzando prima la scheda *Airboard* ricevuta, poi la scheda di controllo *Tiltyboard* realizzata per il progetto, spiegando le scelte effettuate in fase di progettazione e la modalità di realizzazione

Nel capitolo cinque si descrive il *sistema di controllo* applicato nel robot e le scelte sul *filtro* utilizzato per la *stima dell'angolo*.

Nel capitolo sei sono riportati i dati relativi alle prove sperimentali eseguite con il robot e quindi *test di inclinazione a ruote bloccate* e *test di inclinazione dinamico*.

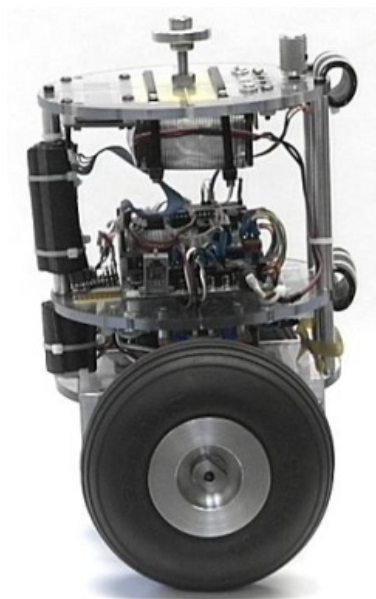
Nella sezione sette sono riportate le conclusioni a proposito del lavoro effettuato ed alcune linee guida da seguire per proseguire sulla strada dell'implementazione del controllore per il robot a bilanciamento Tilty.

## Stato dell'arte

Il problema del *pendolo inverso* è uno tra i più studiati in letteratura per via della naturale instabilità del sistema. Questa caratteristica oltre a quella della possibilità di una formulazione relativamente semplice (o comunque semplificabile) delle relazioni analitiche tra le variabili che descrivono il sistema, hanno portato gli studiosi dei sistemi di controllo ad utilizzare la stabilizzazione del pendolo inverso come applicazione per lo studio e l'analisi dei sistemi di controllo oltre che come metro di paragone delle prestazioni tra differenti controllori. I primi ad utilizzare il pendolo inverso come strumento di *benchmark* per sistemi di controllo sono stati, nel 1968, *Michie e Chambers* in [1], ma la più grande popolarità è stata raggiunta dopo la pubblicazione, nel 1983, di [2] da parte di *A.G. Barto* e *R.S. Sutton*, i padri dell'apprendimento per rinforzo.

Negli ultimi anni è cresciuto l'interesse verso la costruzione pratica di robot basati sulla struttura del pendolo inverso per via della loro maggiore agilità nell'aggirare ostacoli e muoversi su diversi tipi di terreni e per l'abbassamento dei costi delle tecnologie necessarie alla realizzazione.

Il primo robot a bilanciamento su due ruote coassiali documentato è *nBot* [6]. Si tratta di un piccolo robot dotato di encoder sui motori (per la misurazione della velocità di rotazione delle ruote) di un accelerometro, un giroscopio e un inclinometro.



**Figura 2.1** *nBot*, <http://www.geology.smu.edu/dpa-www/robo/nbot/>



Per stimare l'inclinazione è stata utilizzata la tecnica del *filtro complementare* [3] manipolando gli ingressi dell'accelerometro e del giroscopio, il segnale viene successivamente filtrato attraverso un *filtro di Wiener* [4], il quale compara il segnale ottenuto con quello fornito dall'inclinometro. Il risultato viene poi analizzato attraverso un *filtro di Kalman* [5] per ricavarne quindi la posizione, procedura nata per misurare e controllare rollio e beccheggio di elicotteri autonomi [7]. Per effettuare un corretto dimensionamento dei parametri dei filtri è necessario avere a disposizione una serie di dati sperimentali e le corrispondenze tra inclinazione reale e dati acquisiti in ogni istante di tempo e per varie frequenze.

Il più famoso, nonché l'unico veicolo elettrico a bilanciamento di tipo commerciale, è il *Segway*, inventato da *Dean Kamen* e commercializzato nel 2001. I suoi componenti interni non sono pubblicati, allo stesso modo non si è a conoscenza dell'algoritmo di controllo né del tipo di analisi effettuata dai costruttori. Per la misurazione dell'angolo viene utilizzato il FAS-G della Microstrain, un inclinometro molto costoso (oltre 800\$) ma preciso e veloce, che al suo interno utilizza accelerometri e giroscopi per misurare l'inclinazione compensando le componenti orizzontali, normali e tangenziali dell'accelerazione a cui è sottoposto. Il Segway è un mezzo di trasporto veloce, affidabile ed incredibilmente semplice da usare ed esegue un controllo dell'equilibrio eccellente per velocità di reazione e precisione.



**Figura 2.2** Segway, [www.segway.it](http://www.segway.it)

Si susseguono poi una gran quantità di robot sviluppati sia in campi universitari, sia nella sfera hobbistica, che si differenziano per tipi di controllore, processori e i sensori usati.

Tra i tanti vale la pena di ricordare i seguenti:

*Joe le pendule*[8]: un robot sviluppato a Losanna, Svizzera, presenta alle spalle un consistente lavoro di modellizzazione è dotato di sensore di velocità angolare ed encoder ottico posto sulle ruote. La stima dell'angolo avviene per integrazione numerica della velocità angolare, i dati poi subiscono delle pesanti elaborazioni matematiche attraverso un FPGA della Xilinx. Il robot è capace di eseguire traiettorie curve ed è comandato a distanza.



**Figura 2.4** *Joe le pendule*, <http://leiwwww.epfl.ch/joe/>

*Bender*[9]: sviluppato da *Ted Larson* e *Bob Allen* appartenenti al *Home Brew Robots Club* dotato di un giroscopio e un accelerometro a due assi, basato sulla stima angolare ottenuta da un filtro di Kalman.



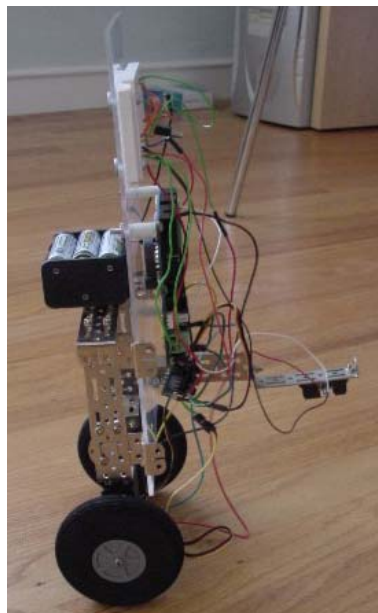
**Figura 2.3** *Bender*, <http://www.tedlarson.com/robots/balancingbot.htm>

LegWay[10]: sviluppato dal *team hassenplug* interamente costruito con pezzi della LEGO, basa la stima dell'angolo su dei sensori di prossimità a infrarossi.



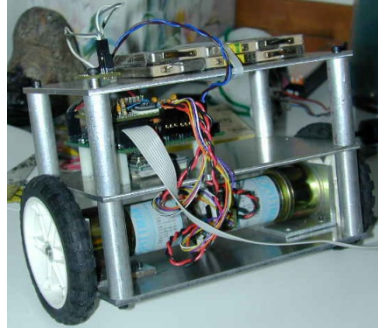
**Figura 2.5** *Legway*, <http://www.teamhassenplug.org/robots/legway/>

Equibot[11]: un robot molto piccolo, sviluppato da Dan Piponi, che basa la stima dell'angolo sui rilevamenti di un sensore di prossimità ad infrarosso. Grazie alle piccole dimensioni e al peso contenuto viene alimentato da solo 6 pile di tipo AA e utilizza un servomeccanismo Hitec HS-311 per la locomozione, controllato da un sistema di controllo PI.



**Figura 2.6** *Equibot*, <http://homepage.mac.com/sigfpe/Robotics/equibot.html>

Gyrobot[12.]: il robot basa il controllo dell'equilibrio sull'informazione ricevuta da un giroscopio rielaborata da un filtro a unico sensore (che analizzeremo al capitolo 5). La stima dell'angolo viene analizzata da un microcontrollore prodotto dall'ATMEL, il quale attraverso un algoritmo, elaborato dal creatore del robot, riesce a compensare la deriva del giroscopio attraverso l'uso di accelerometro a due assi mantenendo il robot in equilibrio con buoni risultati.



**Figura 2.7** *Gyrobot*, <http://www.barello.net/Robots/Gyrobot/>

Balancing scooter e The Electric Unicycle [13]: due mezzi di trasporto sviluppati da Trevor Blackwell, il primo è simile al segway ma con componenti a basso costo, il secondo è un monociclo basato sullo stesso principio del precedente. Il controllore utilizza le informazioni ricevute da un giroscopio e un accelerometro a due assi.



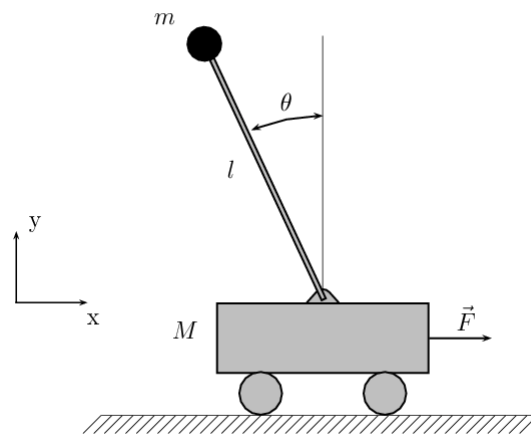
**Figura 2.8** *Balancing scooter*, <http://tlb.org/scooter.html>

## Il problema meccanico

### 3.1 Il pendolo inverso

Il nostro progetto si basa su una versione del principio del pendolo inverso, cioè un pendolo che ha la sua massa al di sopra del suo punto di perno. La particolare conformazione dell'oggetto rende il pendolo inverso un sistema instabile con un punto di equilibrio nella condizione  $\theta = 0$ . La ricerca del mantenimento dell'oggetto nel suo punto di equilibrio è un classico problema di dinamica e teoria del controllo, ampiamente utilizzato per la sperimentazione di sistemi di controllo (PID, reti neurali, controllo fuzzy, ecc. ).

L'esperienza fisica viene spesso effettuata attraverso un carrello in grado di spostarsi orizzontalmente, su ruote o su guida, e un'asta fissata al carrello attraverso una giunta mobile, con alla sua estremità un peso. Muovendo il carrello in modo opportuno si riesce a mantenere il pendolo vicino alla posizione di equilibrio, minore sarà



**Figura 3.1** *Modello classico del pendolo inverso*

l'oscillazione del pendolo, migliore sarà il controllo effettuato.

### 3.1.1 Equazioni del moto

L'equazione del moto è simile a quello di un pendolo tradizionale, ad eccezione del fatto che la posizione angolare è misurata a partire dalla posizione verticale, punto di equilibrio instabile:

$$\ddot{\theta} - \frac{g}{l} \sin \theta = 0$$

Da cui si ricava l'accelerazione angolare:

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{l} \sin \theta$$

Di conseguenza, il pendolo inverso accelererà maggiormente se la distanza posizione verticale aumenta. Tale accelerazione è inversamente proporzionale alla lunghezza del braccio.

### 3.1.2 Il pendolo su un carrello

Le equazioni del moto possono essere derivate facilmente utilizzando le equazioni di Lagrange. Facendo riferimento al disegno dove  $x(t)$  è la posizione del carrello,  $\theta(t)$  è l'angolo del pendolo dalla normale e le forze che agiscono sono gravità e una forza esterna in direzione  $x$ , ricaviamo la Lagrangiana  $L = T - V$ , dove  $T$  è l'energia cinetica nel sistema e  $V$  l'energia potenziale. Così la cui espressione scritta per  $L$  è:

$$L = \frac{1}{2} M v_1^2 + \frac{1}{2} m v_2^2 - mgl \cos \theta$$

dove  $v_1$  è la velocità del carrello e  $v_2$  è la velocità del punto di massa;  $v_1$  e  $v_2$  possono essere espressi in termini di  $x$  e di  $\theta$ , scrivendo la velocità come la derivata prima della posizione:

$$v_1^2 = \dot{x}^2$$

$$v_2^2 = \left( \frac{d}{dt}(l \cos \theta) \right)^2 + \left( \frac{d}{dt}(x + l \sin \theta) \right)^2$$

Semplificare l'espressione per  $v_2$  porta a:

$$v_2^2 = \dot{x}^2 + 2\dot{x}l\dot{\theta} \cos \theta + l^2\dot{\theta}^2$$

La Lagrangiana è ora data da:

$$L = \frac{1}{2} (M + m) \dot{x}^2 + m \dot{x} l \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} m l^2 \dot{\theta}^2 - mgl \cos \theta$$

Le equazioni del moto sono:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = F$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

Sostituendo  $L$  in queste equazioni porta a semplificare le equazioni che descrivono il moto del pendolo inverso:

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + m\ddot{\theta} \cos \theta - m\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \\ ml(-g \sin \theta + \ddot{x} \cos \theta + \ddot{\theta}) = 0 \end{cases}$$

Queste sono equazioni non lineari, ma dal momento che l'obiettivo del sistema di controllo sarebbe quello di mantenere il pendolo in posizione verticale le equazioni possono essere linearizzate per  $\theta \cong 0$ .

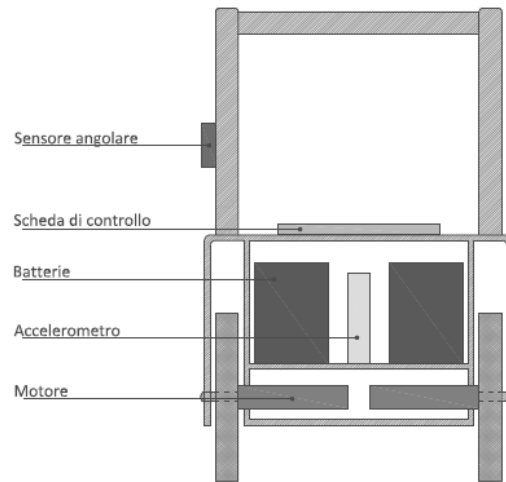
## 3.2 La meccanica di Tilty

### 3.2.1 Particolari costruttivi



**Figura 3.2** *Tilty*

Tilty è formato da una cassa metallica nella quale vengono alloggiare le due batterie. Nella parte inferiore sono assicurati i due motori a corrente continua, sui cui alberi vengono calettate le ruote attraverso delle flange. Nella parte superiore abbiamo una struttura formata con dei prodotti ITEM che serve sia a bilanciare i pesi dell'oggetto, sia a una più comoda presa.



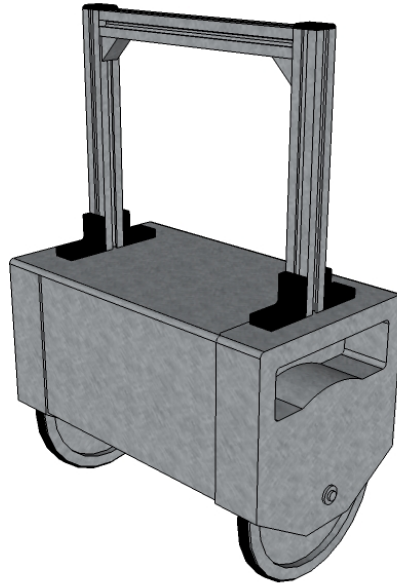
**Figura 3.3** *Sezione di Tilty*

Bisogna portare particolare attenzione alla parte meccanica che trasmette la potenza dall'albero motore al terreno. Questa fase infatti è molto critica: il robot completo pesa 9.3Kg, che vanno accelerati o fermati in spazi molto piccoli. I momenti torcenti vanno quindi ad affaticare gli alberi motore e le flange di congiungimento. Le condizioni degli alberi motore ricevuti all'inizio del progetto erano infatti pessime: la fresata era quasi assente ed erano visibili grossi solchi, questo non permetteva il perfetto fissaggio della flangia che quindi non era in linea con l'albero stesso. Oltretutto la bronzina presente sul carter esterno non era perfettamente in linea con l'albero facendo sì che forzando la posizione i due alberi si stortassero dall'asse.



**Figura 3.4** *Condizioni dell'albero motore*

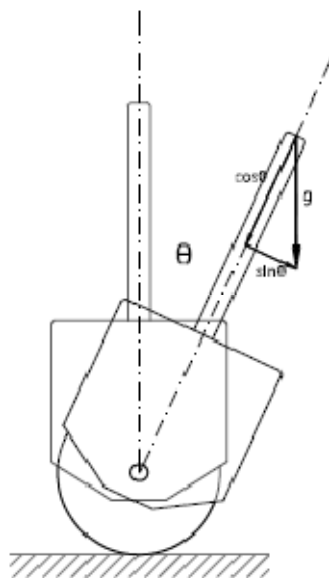




**Figura 3.5** *Modello 3D di Tilty*

I motori utilizzati sono due Maxon RE-max 29 da 22 Watt con un riduttore 33:1, probabilmente non è la miglior scelta operabile, Tilty infatti ha una risposta molto lenta al cambio di velocità, soprattutto a basse inclinazioni. Il motore libero dal carico inizia a girare solo dal 10% del PWM, questo comporta una zona morta del 20%, che non permette al robot la stabilità per angoli veramente piccoli. La non perfetta simmetria della struttura, e le diverse condizioni dei motori trasmettono una differente resistenza ai due alberi motore, questo comporta una differente velocità di rotazione delle ruote a parità di PWM, comportamento che andrebbe compensata via software, per evitare che il robot segua una traiettoria curva.

### 3.2.2 Analisi fisica



**Figura 3.6** *Effetti della forza di gravità sul robot*

Il modello fisico, per essere trattato con comodità, è stato suddiviso in varie parti per poter ricavare le equazioni del moto ed il momento di inerzia della struttura.

Ricaviamo ora le equazioni di stato del sistema, bilanciando le forze orizzontali sull'asse delle ruote:

$$F = m_r \ddot{x} + b \dot{x} + N$$

Dove:

$$m_r = 2(massa_{ruota} + massa_{motore})[Kg]$$

$$b = \text{coefficiente di attrito dinamico} \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

Mentre quelle sul carrello sono:

$$N = m_c \ddot{x} + m_c l \ddot{\theta} \cos \theta - m l \dot{\theta}^2 \sin \theta$$

Dove:

$$m_c l \ddot{\theta} \cos \theta = \text{accelerazione tangenziale}$$

$$m l \dot{\theta}^2 \sin \theta = \text{accelerazione normale}$$

$$m_c = massa_{carrello} = massa_{castello} + 2 \cdot massa_{batteria} + massa_{struttura}$$

$$l = \text{distanza del baricentro del carrello dall'asse delle ruote}$$

Ricaviamo quindi la componente perpendicolare:

$$P \sin \theta + N \cos \theta = m g \sin \theta + m_c l \ddot{\theta} + m \ddot{x} \cos \theta$$

Introducendo la somma dei momenti sul carrello:

$$l N \cos \theta + l P \sin \theta + J_p \ddot{\theta} = 0$$

Sostituendo:

$$(J_p + m l^2) \ddot{\theta} + m g l \sin \theta + m \ddot{x} \cos \theta = 0$$

Il sistema finale risulta:

$$\begin{cases} (m_r + m_c) \ddot{x} + b \dot{x} + m_c l \ddot{\theta} \cos \theta - m l \dot{\theta}^2 \sin \theta = F \\ (J_p + m l^2) \ddot{\theta} + m g l \sin \theta + m \ddot{x} \cos \theta = 0 \end{cases}$$

Linearizzando in un intorno stabile (  $\theta = \pi + \varphi$ , dove  $\varphi$  rappresenta una piccola variazione dell'angolo e quindi  $\sin \theta \cong -\varphi$  e  $\cos \theta \cong 0$  ) si ottiene:

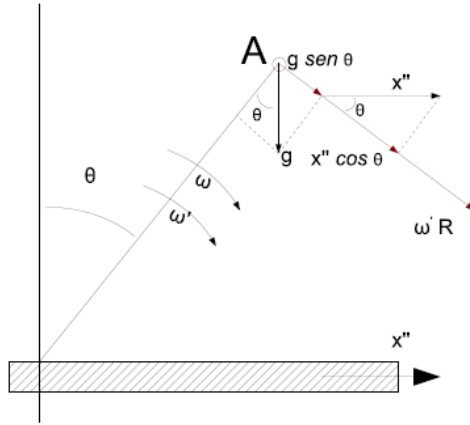
$$\begin{cases} (m_r + m_c)\ddot{x} + b\dot{x} - m_c l \ddot{\theta} = F \\ (J_p + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\varphi - m\ddot{x}l = 0 \end{cases}$$

### 3.2.3 Le forze sull'accelerometro

Le equazioni dell'accelerazione rilevata sui due assi dell'accelerometro sono:

$$l_{or} = g \sin \theta + a \cos \theta + \dot{\omega} R$$

$$l_v = g \cos \theta + a \sin \theta + \omega^2 R$$



**Figura 3.7** Forze rilevate dall'accelerometro

Posizionando l'accelerometro sull'asse di rotazione delle ruote, così da minimizzare le accelerazioni tangenziale e normale (considerando quindi un  $R$  piccolo) e sostituendo:

$$\sin \theta = \frac{\tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$

$$\cos \theta = \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta}{2}}$$

$$t = \tan \frac{\theta}{2},$$

otteniamo:

$$\begin{cases} t^2(l_{or} + a) - 2gt + l_{or} - a = 0 \\ t^2(l_v + g) + 2at + l_v - g = 0 \end{cases}$$

Utilizzando un simulatore come Maple otteniamo la soluzione reale per  $t$  :

$$t_{1,2} = 2 \frac{l_{or} \pm \sqrt{l_{or}^2 + l_v^2 + g^2}}{l_v + g}$$

Studiando la soluzione in funzione di  $l_{or}$  e  $l_v$  possiamo verificare che la stima così effettuata porta ad un risultato esatto per  $\theta = 2 \tan^{-1} t$  prendiamo la radice positiva per  $a < 0$  e quella negativa per  $a > 0$ , mentre il radicando è nullo per  $a = 0$ .

Riassumendo:

$a < 0$	$t = 2 \frac{l_{or} + \sqrt{l_{or}^2 + l_v^2 + g^2}}{l_v + g}$
$a > 0$	$t = 2 \frac{l_{or} - \sqrt{l_{or}^2 + l_v^2 + g^2}}{l_v + g}$
$a = 0$	$t = 2 \frac{l_{or}}{l_v + g}$

## Il problema elettronico

### 4.1 L’Airboard

La scheda di controllo ricevuta dalla scorsa tesi soffriva di alcuni problemi, dovuti principalmente al fatto che la scheda non era stata progettata per il mantenimento in equilibrio del robot, ma per comandare i movimenti di altri robot. Le modifiche successive volte a stabilizzare e risolvere i problemi si sono concentrate principalmente nella parte software. La scheda di controllo monta a bordo un regolatore lineare un regolatore switching per ottenere i 5V necessari al funzionamento della logica a bordo. Il cuore del sistema è un microcontrollore Microchip PIC 18F252, quarzato a 10Mhz, a cui è affidato il controllo del robot. Il microcontrollore riceve, attraverso ADC, i dati dell’accelerometro e del sensore di velocità angolare, mentre i dati degli encoder dei motori vengono raccolti attraverso due pin collegati a timer hardware integrati.

Il controllo di potenza viene effettuato fornendo ai due H-Bridge da 155 Watt di potenza massima, due segnali indipendenti in Pulse Wave Modulation (PWM), uno per ogni motore.

La scheda è in grado inoltre di comunicare con l’esterno tramite interfaccia seriale RS232 e I2C e può essere programmata tramite il connettore In Circuit Serial Programming (ICSP).

L’accelerometro ADXL202 è un sensore economico, affidabile e semplice da usare, rileva le accelerazioni su due assi in un range di  $\pm 2g$ . L’accelerometro può fornire un segnale analogico compreso tra 0 e 5V oppure un’onda quadra con duty-cycle proporzionale al valore dell’accelerazione. Per questa applicazione l’acquisizione viene effettuata attraverso l’interfaccia analogica.

Il sensore di velocità angolare CRS05, pur essendo un sensore economico, offre prestazioni affidabili rilevando le accelerazioni angolari a cui è sottoposto e fornendo un segnale analogico compreso tra 0 e 5V con un range di  $\pm 50^\circ/s$ .

Gli impulsi emessi dagli encoder vengono acquisiti dal microcontrollore attraverso la periferica CAPTURE/COMPARE utilizzata come contatore hardware di impulsi. In questo modo, la periferica si preoccupa di contare gli impulsi e di aggiornare un registro, così da poterne leggere il valore nel momento in cui è necessario. I due encoder ottici sono inseriti in un modulo della Maxon che si pone sul posteriore del motore, questo modulo acquisisce le informazioni dall’albero motore ed è capace di

rilevare 512 impulsi a giro dell'albero, con una frequenza massima di 320KHz. Ognuno degli encoder in uso fornisce in uscita due onde quadre sfasate di 90 gradi l'una rispetto all'altra: contando gli impulsi sappiamo il numero di giri che il motore sta effettuando, mentre calcolando la sfasatura conosciamo la direzione del moto. La scheda inoltre è in grado di calcolare il verso di rotazione dei motori e questa informazione è presentata sui pin 22 e 24 del PIC.

Analizzando più da vicino la scheda si notano alcuni errori di progettazione.

Il primo errore che si presenta è la mancanza di resistenze di pull down sulle linee che comandano i ponti H, questo permette nel momento dell'accensione del sistema a della carica di passare attraverso il ponte H e caricare positivamente il pin di controllo del pwm, non riesce a forzare il segnale basso. A causa delle non perfette connessioni questo inconveniente si ripete anche muovendo il cavo che unisce le due schede e porta i segnali dalla scheda di controllo a quella di potenza. Questo errore crea una rotazione improvvisa di una ruota che comporta quindi la caduta del robot.

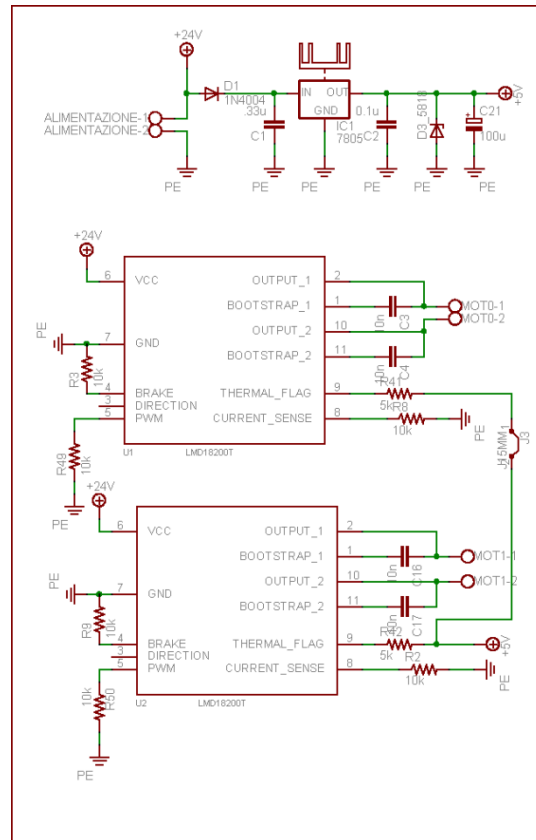
Si possono poi notare che i segnali provenienti dai sensori vengono direttamente mandati al PIC, saldando direttamente i cavi sui pin del microcontrollore. Questo è critico per la bontà dell'analisi sia perché i segnali provenienti dall'accelerometro a due assi che variano in meno di mezzo volt, sia perché i segnali subiscono un brusco peggioramento dovuto alla presenza di un carico non ottimale. Con la variazione di posizione del robot a  $+20^\circ$  e  $-20^\circ$  dall'asse verticale i segnali provenienti dai due assi dell'accelerometro variano rispetto all'asse x di 10mV e rispetto all'asse y di 70 mV. Questi segnali poi vengono analizzati dal micro con l'ADC integrato a 10 bit, capace di discernere livelli di 4mV , sfruttando rispettivamente solo 10 e 2 livelli dei 1024 della scala dell'ADC.

## 4.2 Tilty board

### 4.2.1 Analisi circuitale

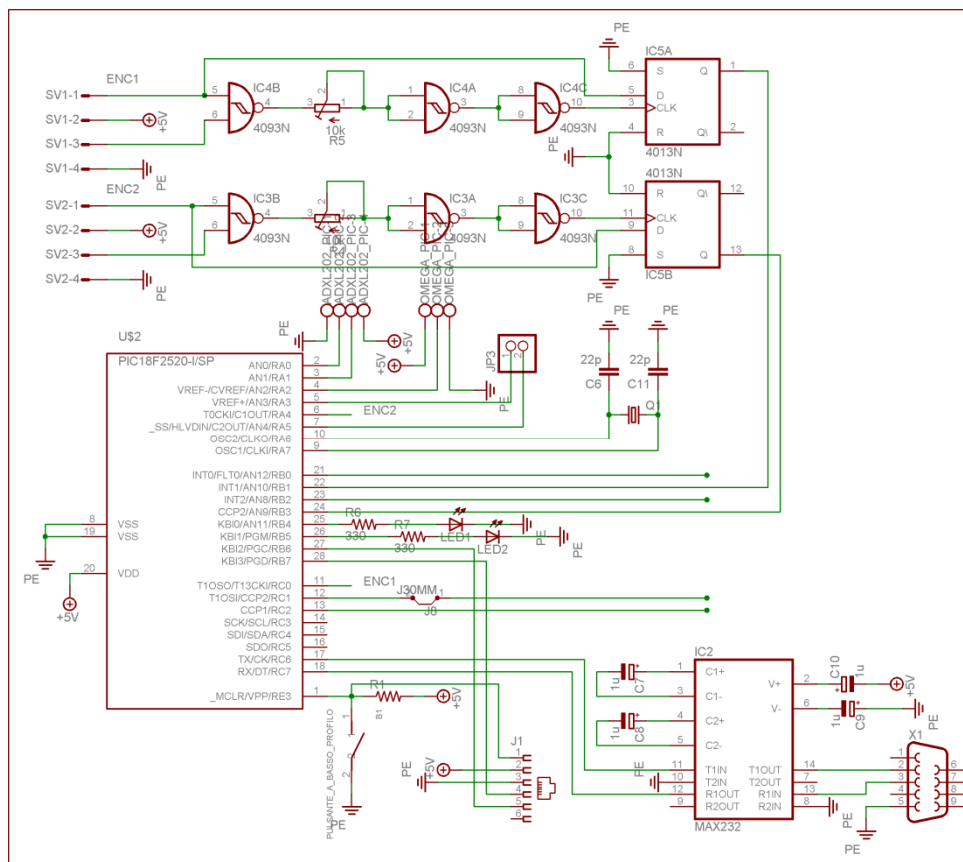
Una volta considerati i problemi della vecchia scheda si è preferito svilupparne una nuova, più adatta al robot, senza però stravolgere la filosofia che stava alla base della precedente. La nuova scheda si basa quindi sullo stesso processore e sugli stessi ponti H precedentemente utilizzati, ma inserendo la fase di preamplificazione dei segnali e rendendo più accessibili tutti gli ingressi e le uscite del sistema, in modo da facilitare il lavoro di sviluppo del prototipo.

L'impostazione della scheda che andiamo ora a presentare, può essere scomposta in alcune parti per comodità nella spiegazione.

*L'alimentazione***Figura 4.1** *Tilty board, Schema circuitale dell'alimentazione*

L'alimentazione al sistema avviene attraverso l'utilizzo di 2 batterie da 12 volt poste in serie capaci di generare 7.2 Ah. Esse sono direttamente collegate con i ponti H, in modo da riuscire a fornire ai motori la maggior tensione possibile e quindi sviluppare la maggior potenza ottenibile dal sistema. La parte a bassa tensione è gestita da un regolatore 7805 nella sua configurazione standard, capace di erogare fino a 1° di corrente. Per evitare che qualsiasi disturbo dovuto all'interferenza provocata dal segnale PWM arrivi a gli integrati viene inserito un condensatore di disaccoppiamento vicino ad ogni chip.

Questa configurazione presenta un inconveniente notato anche nella precedente scheda: se si fanno ruotare le ruote a scheda non alimentata i motori si trasformano in dinamo e forniscono tensione a tutta la scheda. Per risolvere il problema andrebbero inseriti dei diodi in serie ai motori per evitare il possibile ricircolo di corrente, ma questo comporterebbe una perdita di tensione sui motori e l'inserimento di un ulteriore offset tra la tensione fornita e l'effettiva rotazione dei motori. Analizzata la criticità del rapporto peso-potenza del robot e la relativa diminuzione di coppia di quando il sistema agisce nella sua regolare funzione si è preferito mantenere questo schema e sfruttare la piena potenza dei motori.

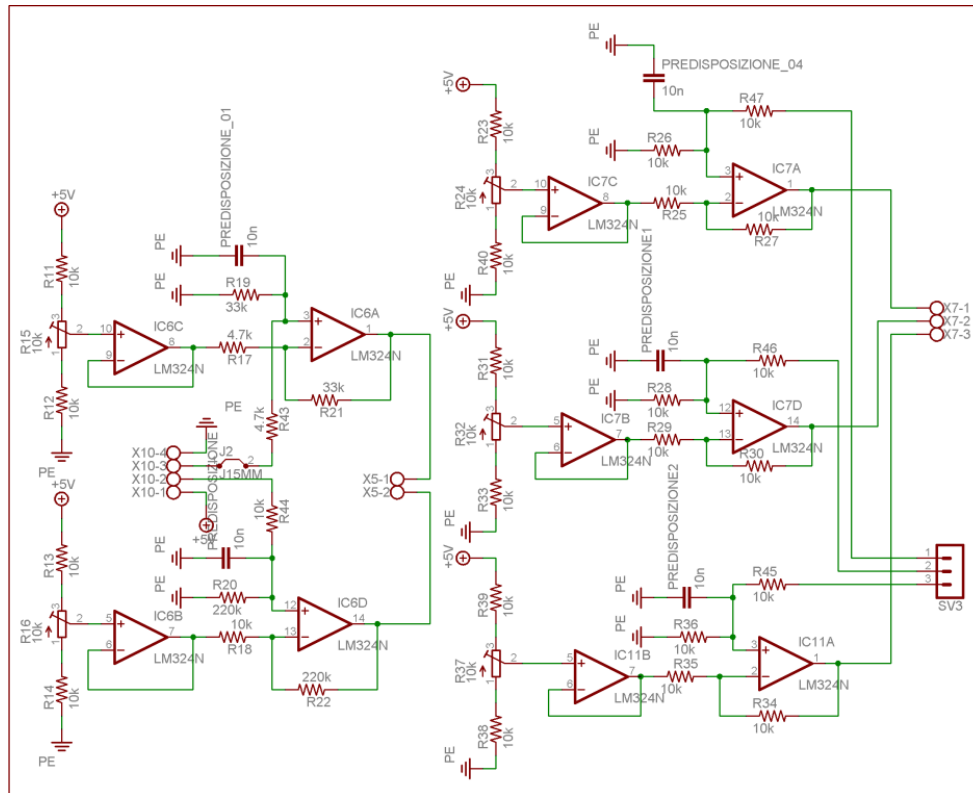
*Il microcontrollore*

**Figura 4.2** Tilty board, Schema circuitale connessioni del microcontrollore

Il cuore del sistema come abbiamo detto in precedenza rimane il PIC 18f252 utilizzato come nella scheda precedente a 10 MHz, sfruttando i convertitori analogico-digitale integrati per gli ingressi provenienti dai due accelerometri, il modulo di trasmissione seriale per il trasferimento dati e la periferica CAPTURE/COMPARE come contatore hardware di impulsi per misurare le uscite degli encoder ottici.

Sono stati aggiunti due led di debug e un connettore del tipo rj11 per una rapida connessione del circuito di programmazione\debugger ICD2, inoltre è stato predisposto l'ingresso per l'utilizzo di un secondo accelerometro per poter fare test futuri e per l'eventuale inserimento di una ventola.

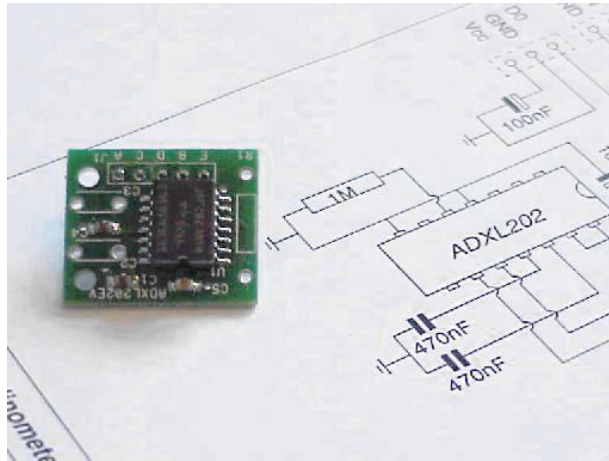


*Trattazione segnali*

**Figura 4.3** Tilty board, schema per la preamplificazione dei segnali

La trattazione dei segnali era il vero tallone d'Achille della scheda precedente: l'inserimento di alcuni preamplificatori e filtri ha portato ad un notevole incremento della qualità degli ingressi.

L'analisi circuitale si può separare in due parti: nella prima si nota un regolatore di tensione, regolabile attraverso un trimmer, dove andiamo a regolare l'offset da sottrarre al segnale, viene poi posto in serie un inseguitore di tensione per disaccoppiare il circuito a valle; nella seconda troviamo un sottrattore con le resistenze appositamente pesate che amplifica e sottrae l'offset al segnale in ingresso. Questo procedimento si deve effettuare perché l'accelerometro ha un'uscita tra 0 e 5V ma tra  $-2g$  e  $+2g$ , mentre le condizioni di funzionamento del robot in questo caso sono molto più ristrette. Nelle nostre condizioni la variazione dell'accelerazione verticale è  $\pm \cos \theta$  centrato in  $1g$ , mentre quella dell'accelerazione orizzontale è  $\pm \sin \theta$  centrato in 0 con oscillazioni massime del robot  $10-15^\circ$ . Quindi il segnale elettrico prima della preamplificazione varia di 10 mV per l'asse x e 70 mV per l'asse y, dopo la preamplificazione 3.5 V per l'asse x e 4 V per l'asse y. Grazie quest'aumento di ampiezza del segnale si riesce a sfruttare meglio la dinamica dell'ADC integrato.

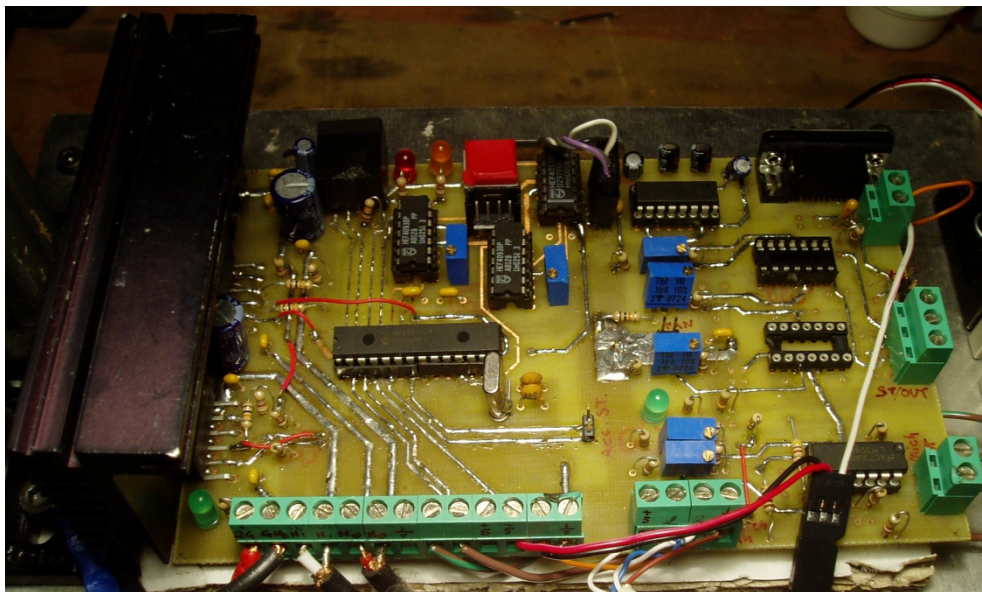


**Figura 4.4** Accelerometro Analogic Device ADXL202

Sulla scheda, per ogni preamplificatore, è stata predisposta la possibilità di inserire dei filtri passa basso del primo ordine passa basso, questa possibilità è facilmente applicabile aggiungendo il resistore e il condensatore nei drill appropriati.

#### *Il circuito stampato*

Il layout del circuito stampato è stato realizzato con il supporto del programma Eagle e successivamente autoprodotta in laboratorio. Si è scelto di posizionare i componenti unicamente sul TOP, per una più semplice gestione della scheda.



**Figura 4.5** Tilty board

Per la sua realizzazione è stato usato il metodo Press-n-Peel ma senza grande successo. L'idea alla base della Press-n-Peel è quella di utilizzare come vernice isolante il toner della stampante laser o della fotocopiatrice, trasferito a caldo direttamente dal foglio di carta speciale al rame. Il processo è piuttosto semplice:

- stampare il master con una stampante laser o una fotocopiatrice usando gli speciali fogli di colore blu Press-n-Peel;
- preriscaldare il rame attraverso l'uso di un normale ferro da stiro; appoggiare il foglio Press-n-Peel sul lato rame della basetta in modo tale che la stampa ed il rame siano direttamente affacciati;
- quindi appoggiare il ferro da stiro con temperatura regolata su tessuti sintetici e attendere tre o quattro minuti lasciando ben riscaldare la piastra di rame;
- successivamente raffreddare con acqua corrente, togliere delicatamente il foglio e rimuovere residui indesiderati di pellicola dalla piastra ramata.

I problemi riscontrati nell'utilizzo di questa tecnica sono legati al trasferimento a caldi della vernice isolante: in molte parte del circuito, complice la pressione e il riscaldamento non omogenei, la vernice non aderiva o aderiva anche dove non c'era la stampa laser. Il circuito quindi dopo il bagno nel cloruro ferrico presenta molteplici connessioni e non connessioni indesiderate.

Si è scelto quindi di utilizzare il metodo della foto incisione, mediante il quale si possono raggiungere risultati di ottimo livello anche se eseguito in maniera artigianale. La procedura è un po' più complessa della precedente:

- stampare il design del circuito su carta lucida;
- porre la precedente stampa su una basetta per circuiti stampati con vernice fotosensibile ed esporla a raggi UV per qualche minuto, per impressionare la vernice fotosensibile con lo schema del circuito sulla scheda;
- Inserire la scheda in un bagno di soda caustica in modo da rimuovere il fotoresist;
- Inserire poi la scheda in un bagno di cloruro ferrico, il quale scioglie il rame non protetto dal fotoresist;

*Top*

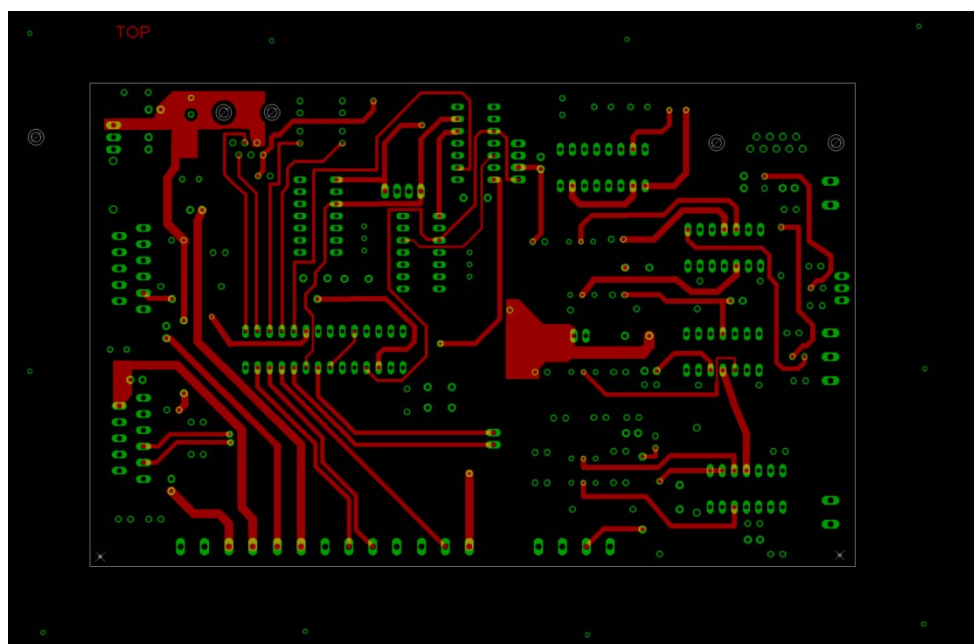


Figura 4.6 Tilty board, top del pcb

*Bottom*

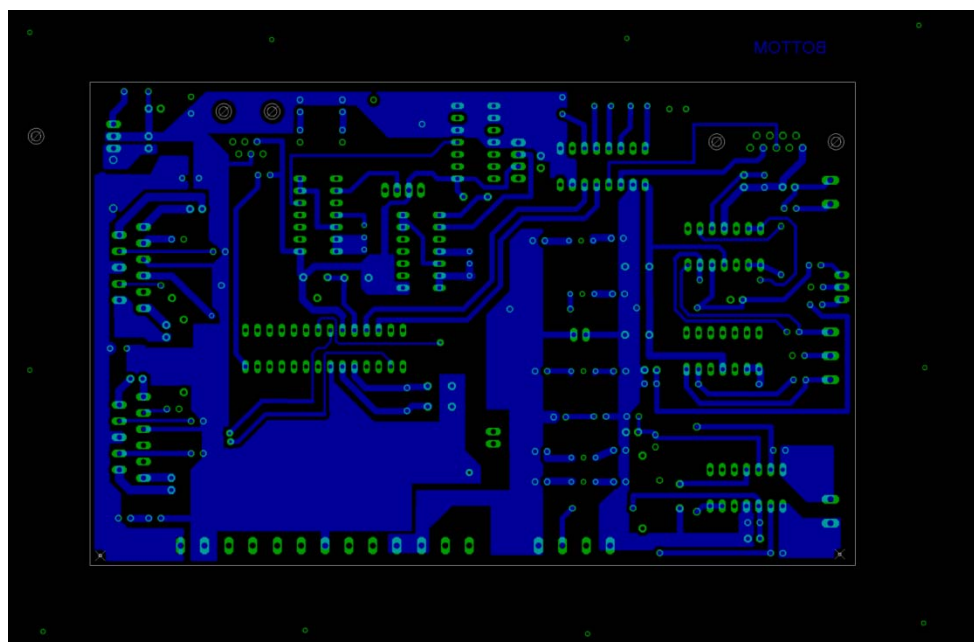


Figura 4.7 Tilty board, bottom del pcb

## Il problema di controllo

### 5.1 Stima dell'angolo

Uno degli aspetti critici del controllo è la stima dell'angolo del robot, questa deve avvenire attraverso l'uso dei segnali provenienti dall'accelerometro a due assi e dal sensore angolare.

Il primo passo è quello di leggere per ogni sensore gli input analogici attraverso l'ADC del microprocessore. Ciò richiede la compensazione di un offset facile da trovare: basta ricercare il valore che il sensore legge quando il robot è fermo in posizione verticale.

Per avere una stima del angolo di  $360^\circ$  sono necessarie sia l'accelerazione dell'asse X, che dell'asse Y, con le quali si può utilizzare la trigonometria per trovare l'angolo dall'arcotangente delle due letture. In un robot a bilanciamento non è però fondamentale la conoscenza dell'angolo per qualsiasi posizione, ma sono più importanti le misure degli angoli vicini alla verticale ( $\pm 25^\circ$ ) ed è possibile tralasciare il resto della scala.

Nel metodo di stima dell'angolo bisogna anche tener conto delle forze esterne che possono arrivare all'accelerometro, come quelle introdotte dall'accelerazioni del robot grazie ai motori o quelle dovute alle asperità del terreno. È utile quindi integrare le informazioni dell'accelerometro con quelle ricevute dal giroscopio, il quale è meno soggetto a questi disturbi, ma presenta il problema della deriva.

La deriva avviene perché il giroscopio non legge perfettamente zero quando è fermo, il piccolo segnale emesso, integrato per unità di tempo, cresce linearmente finché non abbiamo un segnale diverso da quello reale.

Analizziamo ora i diversi tipi di approccio che sono stati utilizzati per ottenere una stima dell'angolo e della velocità angolare.

### 5.1.1 Metodo diretto

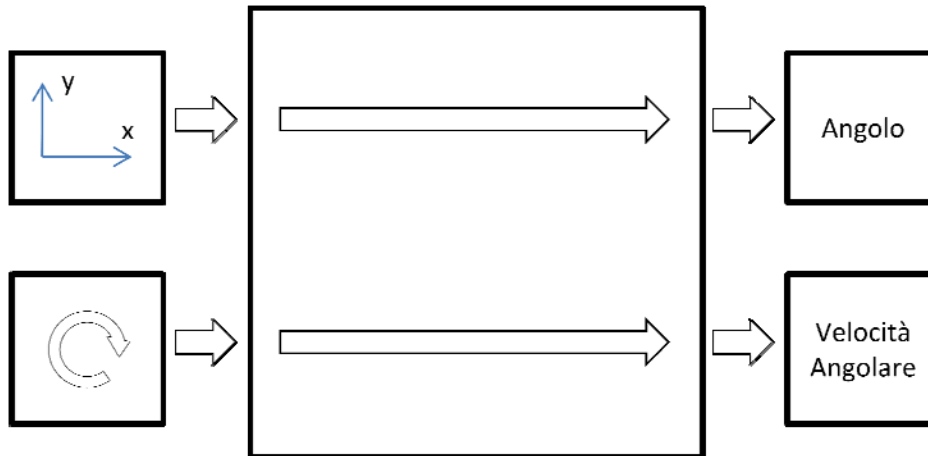


Figura 5.1 Metodo diretto

Codice per l'implementazione:

```

root=lor*lor+lv*lv-g*g;
if(root<0.0)root=0.0;
if(acc>=0)
theta=2.0*atan((lor-sqrt(root))/(lv+g))
else
theta=2.0*atan((lor+sqrt(root))/(lv+g));

```

La stima dell'angolo diretta è quella implementata nel precedente controllo partendo dall'idea fisica espressa nel capitolo 2. Il metodo non fornisce risultati soddisfacenti, risentendo troppo del rumore meccanico ed elettronico, particolarmente pre quanto riguarda l'accelerazione verticale.. Il primo è causato sia dalla non perfetta costruzione del robot, sia dall'asperità del terreno, sia dall'incapacità del controllore di discernere la differenza tra la componente della forza di gravità e l'accelerazione prodotta dai motori. Il secondo è trascurabile rispetto a quello meccanico.

### 5.1.2 Metodo diretto su unico asse

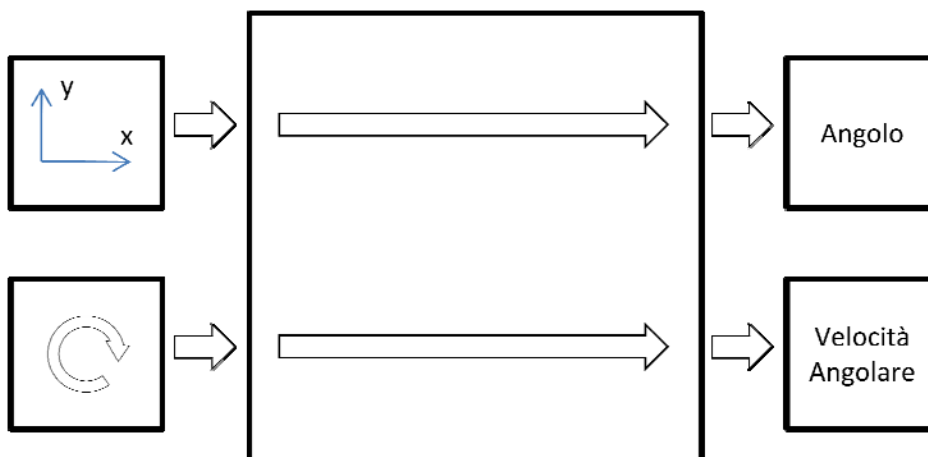


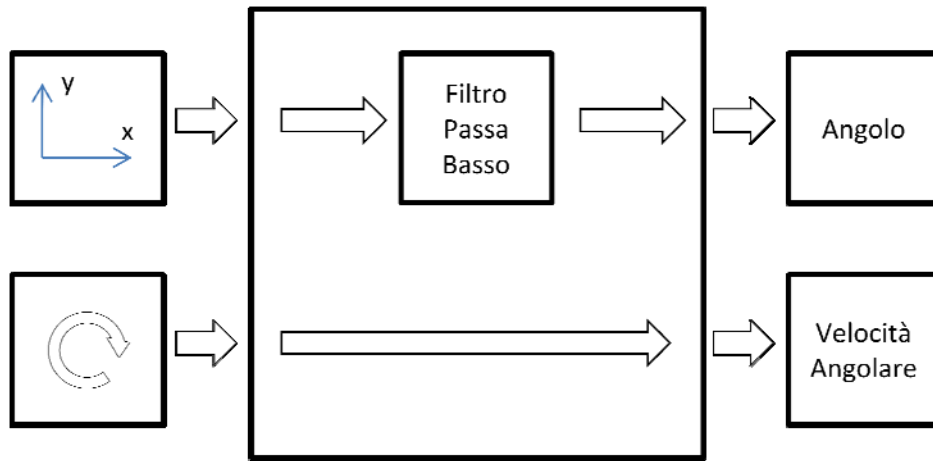
Figura 5.2 Metodo diretto ad unico asse

Codice per l'implementazione:

```
thetaSin = asin ( lor / G );
```

Per minimizzare gli errori introdotti dall'accelerazione verticale si è provato a stimare l'angolo utilizzando solo la componente orizzontale, ricavando l'angolo con una semplice espressione trigonometrica. La stima è migliorata in maniera statica, ma dinamicamente soffre dei medesimi problemi del precedente, principalmente quindi del rumore meccanico.

### 5.1.3 Metodo diretto con filtro passa basso



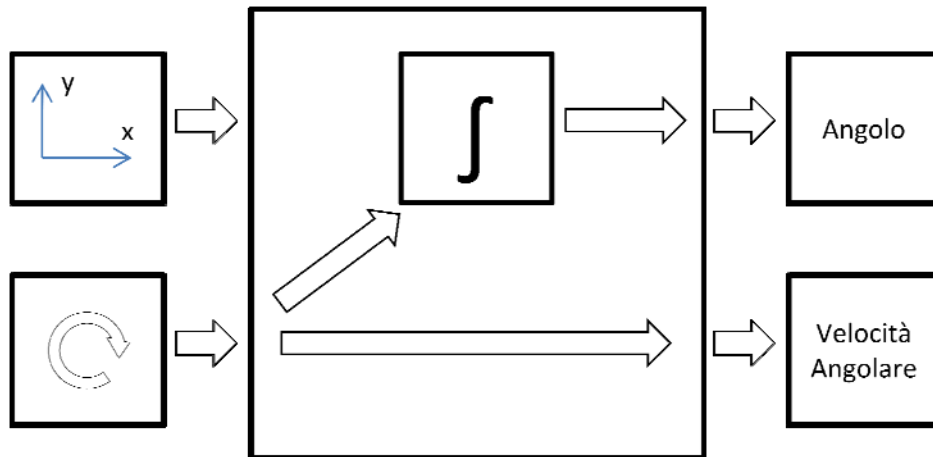
**Figura 5.3** Metodo diretto con filtro passa basso

Codice per l'implementazione:

```
f1W[f1Wc]=theta;
thetaNoFilt = theta;
f1Wa=0.0;
for(blsI=0;blsI<W_SIZE;blsI++)
{
    f1Wa+=bls[blsI]*f1W[(f1Wc+blsI)%W_SIZE]
}
f1Wc=++f1Wc%W_SIZE;
theta=f1Wa;
```

Per migliorare la stima del filtraggio diretto si è inserito un filtraggio di tipo FIR eseguito via software sulle accelerazioni X e Y, con questa soluzione si riesce ad eliminare la componente dovuta ai motori, ma si introduce un ritardo tra l'angolo reale e quello misurato, proporzionale alla qualità di filtraggio del segnale. L'introduzione di questo ritardo è critica la stabilità.

#### 5.1.4 Metodo ad unico sensore



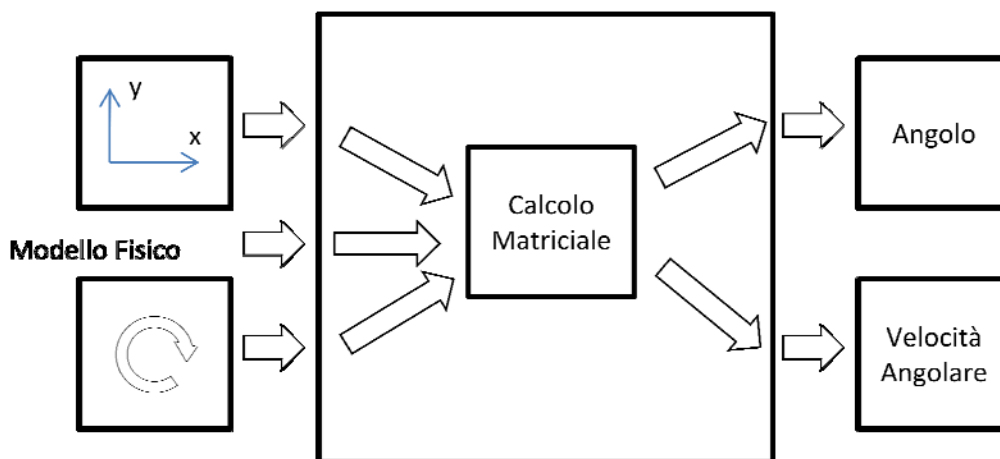
*Figura 5.4 Metodo ad unico sensore*

Codice per l'implementazione:

```
theta=theta+(omega*0.02)
```

Il metodo basato su un unico sensore esegue la stima dell'angolo integrando numericamente la velocità angolare ottenuta dal sensore angolare. L'utilizzo del solo giroscopio rende il processo di stima rapida e non soggetta alle accelerazioni orizzontali, ma si introduce il problema della deriva. Il problema non si evidenzia con facilità, ma si può notare un lento peggioramento delle prestazioni del robot, che culmina in un inspiegabile caduta. Solo analizzando i dati per tempi lunghi si possono apprezzare degli errori abbastanza ampi da palesare il problema.

#### 5.1.5 Filtro di Kalman



*Figura 5.5 Filtro di Kalman*

Il filtro di Kalman è un efficiente filtro ricorsivo che valuta lo stato di un sistema dinamico a partire da una serie di misure soggette a rumore. Per le sue caratteristiche intrinseche è un ottimo filtro per rumori e disturbi agenti sul sistema gaussiani a media



nulla. Le sue stime teoricamente sono tra le miglior ottenibili in questo campo; il filtro però presuppone una particolare conoscenza del modello fisico da analizzare, un grosso numero di dati sperimentali e una pesante algebra matriciale. L'ultimo punto esclude l'utilizzo di questo filtro non adatto alle capacità elaborative del sistema da noi utilizzato, per questo motivo e la complessità di stesura si è preferito non implementarlo.

### 5.1.6 Filtro complementare

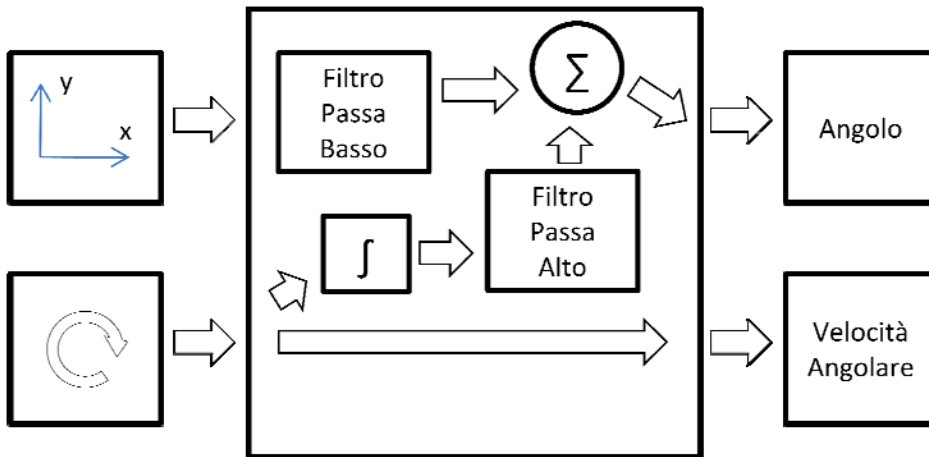


Figura 5.6 Filtro complementare

Codice per l'implementazione:

```
integr = omega * 0.02 ;
theta=0.98*(theta+integr)+0.02*(lor)
```

Il filtro complementare esegue un'integrazione numerica della velocità angolare, come nel filtro ad unico sensore, il segnale poi subisce un filtraggio passa alto. La risultante viene sommata al valore proveniente dalla componente orizzontale precedentemente filtrata attraverso un passa basso. La filosofia del filtro si può interpretare come lasciare le variazioni veloci al filtro ad unico sensore e le variazioni lente a quello diretto. I filtri passa basso e passa alto vengono implementati in maniera digitale.

Intuitivamente l'obiettivo del filtro passa basso è quello di lasciarsi attraversare solo da i cambiamenti a lungo termine, bloccando le fluttuazioni a breve termine. Un modo per farlo è quello di costruire l'uscita a poco a poco, in tempi successivi, attraverso il programma loop.

In codice:

```
y[i]=alpha*x[i]+(1-alpha)*y[i-1]
```

Il filtro passa alto si può immaginare come l'opposto del passa basso, un filtro capace di lasciar passare le variazioni veloci e filtrare i segnali che sono costanti nel tempo.

In codice

```
y[i]=alpha*(y[i-1]+x[i]-x[i-1])
```

La scelta di alpha, la costante di tempo, è possibile ricavarla dalla costante di tempo del filtro utilizzato:

$$\tau = \frac{a * dt}{1 - a} \Leftrightarrow a = \frac{\tau}{\tau + dt}$$

Nel nostro caso otteniamo con  $dt = 20\text{ms}$  e  $a = 0.98$ , otteniamo una frequenza di taglio pari a  $\frac{1}{\tau} = 1\text{Hz}$ .

## 5.2 Il controllore

L'evoluzione del controllore nel progetto è legata all'evoluzione della stima dell'angolo. Avendo a disposizione una stima dell'angolo sbagliata e rumorosa, si è studiata una correzione della stima sia con un controllo LQR, sia con un controllo di tipo Fuzzy, preferendo e implementando il controllore LQR che dava risultati più precisi.

Il controllore implementato è regolato attraverso le costanti K che sono state scelte dopo delle simulazioni in MATLAB del sistema.

Codice per l'implementazione:

```
pwm=K[0]*TICK_TO_M*vel+K[1]*theta+K[2]*omega
```

L'uso di queste costanti ricavate dalle simulazioni presupponeva al conoscenza e modellizzazione del robot e quindi ad ogni minima modifica di peso, struttura o carico bisogna ricalcolare le costanti. Il controllore non ha dato buoni risultati con la nuova stima dell'angolo continuando a dare impulsi che destabilizzavano il robot.

Con miglioramento della stima dell'angolo si è preferito usare un controllore più semplice di tipo proporzionale, legando direttamente l'angolo del controllore al pwm da fornire ai motori, in modo da render più intuitivo l'approccio con le uscite.

Codice per l'implementazione:

```
pwm = (int)(angle*K_SCALE);
```

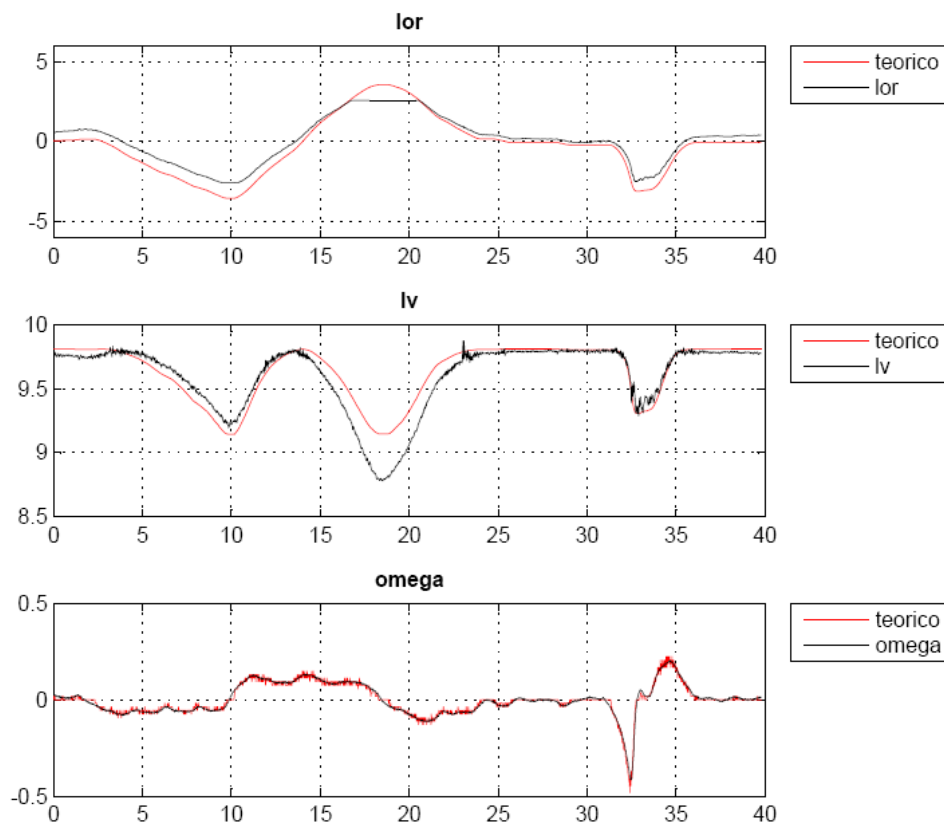
La costante  $K_{scale}$  è stata scelta in seguito a dei test effettuati direttamente sul robot. Grazie a questo regolatore si è riusciti ad ottenere una buona stabilità del robot, anche se il controllo di tipo proporzionale mostra i suoi limiti nel raggiungere e mantenere delle oscillazioni del robot molto piccole. Parte di questo problema si può imputare

alla zona morta. La semplicità del controllore evidenzia quindi che la parte più critica del prototipo è la stima dell'angolo.

## Realizzazioni sperimentali

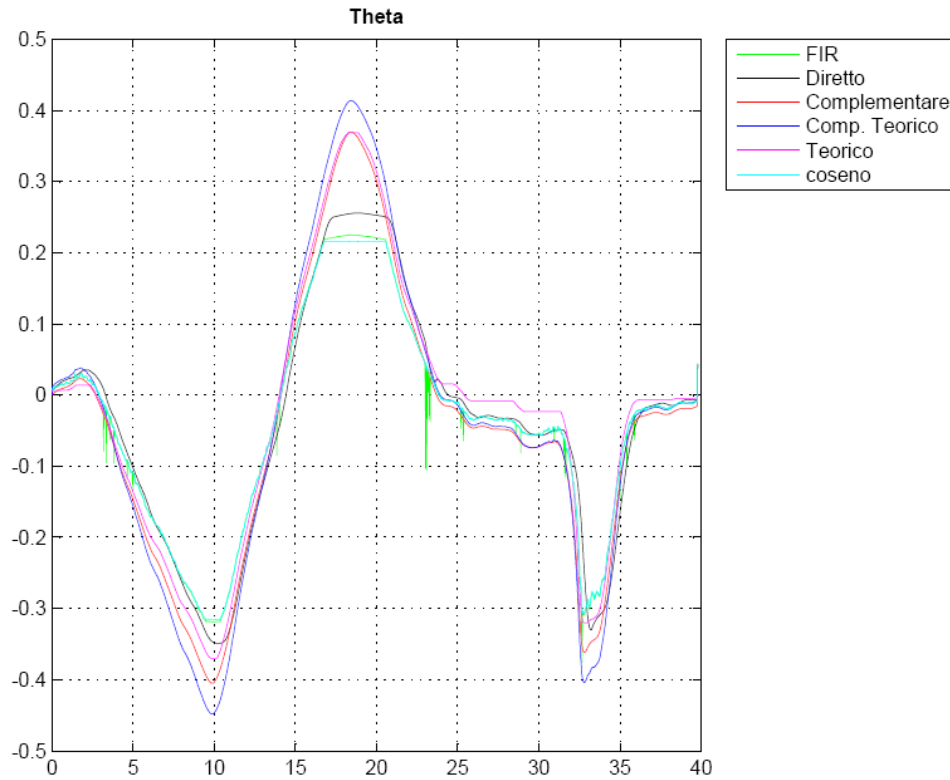
### 6.1 Test a ruote bloccate

Al fine di verificare che la stima dell'angolo produca un risultato corretto e se fosse presente del ritardo nell'acquisizione, si è effettuato un test sperimentale che consiste nell'inclinare il robot mantenendo le ruote bloccate in una posizione. In questo modo la lettura dei dai provenienti dagli encoder posti sul motore danno una stima accurata della velocità angolare da cui si può facilmente ricavare l'angolo assoluto di inclinazione e compararlo con i dati che riceviamo dai sensori. L'unico accorgimento di cui tenere conto è l'accortezza di iniziare l'acquisizione partendo da un angolo noto (ad esempio 0 deg).



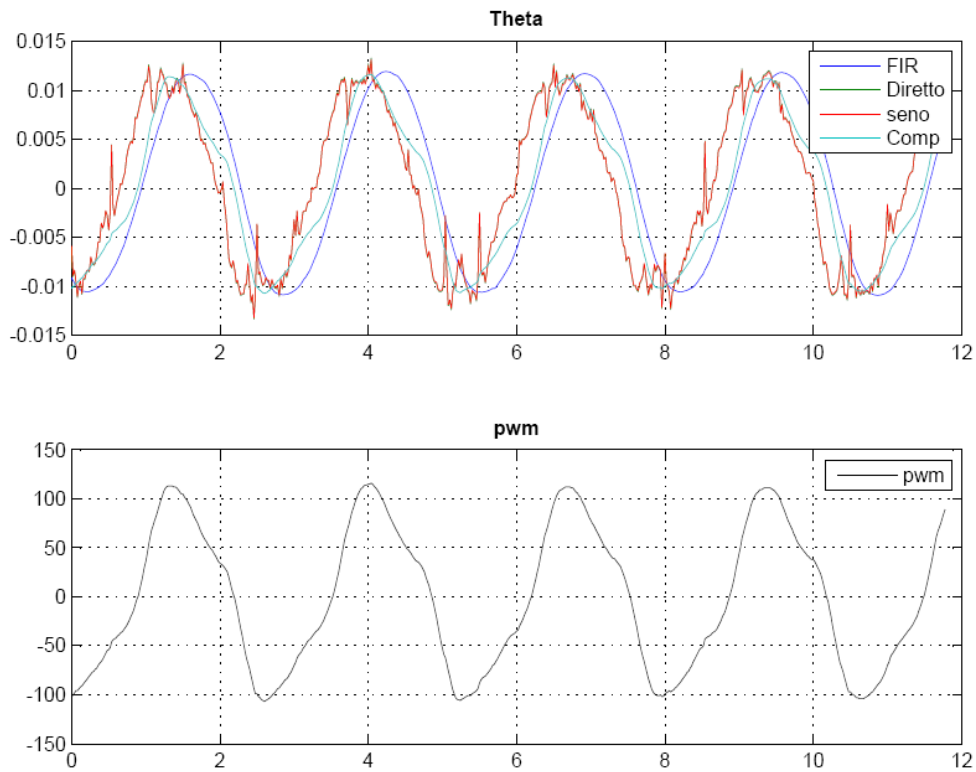
**Figura 6.1** Test a ruote bloccate, grafici Accelerazione orizzontale (I), Accelerazione verticale (II), Velocità angolare (III)

Nei grafici si può notare l'accuratezza del segnale di velocità angolare, mentre il segnale più critico è l'accelerazione verticale. Nel grafico dell'accelerazione orizzontale negli istanti di tempo compresi tra 16 e 21 secondi si nota la saturazione del sistema, questo però non incide poi negativamente nel controllo, poiché è già stato abbondantemente superato l'angolo critico, oltre il quale Tilty non è più grado di riequilibrarsi.



**Figura 6.2** Test a ruote bloccate, grafico stima dell'angolo

Nei grafici si possono monitorare i diversi andamenti della stima rispetto al filtro utilizzato. Il test mostra un ottimo risultato: tutti i segnali riescono a seguire l'andamento dell'angolo. Si può quindi identificare il vero problema della stima: l'analisi effettuata in maniera dinamica, dove alla scomposizione della forza di gravità si vanno a sovrapporre le componenti dovute alla spinta dei motori, che non vengono riconosciute dal controllo.



**Figura 6.3** Test dinamico, grafici Stima angolo (I), Pwm di uscita (II)

Dall'analisi dinamica si può notare che con l'inserimento della motricità del sistema i segnali basati sul filtro diretto e sul seno catturo le componenti orizzontali e rendono il segnale inutilizzabile. L'analisi basata sul metodo diretto filtrato mostra una grossa lentezza nella reazione che rende impossibile la stabilità del sistema. Il filtro complementare scelto si dimostra la possibilità migliore, restituendo un segnale pulito, senza le componenti dovute alla reazione del robot, e con una velocità di risposta migliore rispetto al filtro FIR.

Dal secondo grafico si può capire che il sistema riesce a reagire soltanto dopo che il pwm supera circa i 100/1024 di duty cycle, analizzando invece la ripetitività del segnale si può dire che il sistema non ha raggiunto la stabilità asintotica, ma mantiene un moto oscillatorio nei pressi dell'origine.

## Conclusioni e sviluppi futuri

### 7.1 Conclusioni

La stabilità di un robot a bilanciamento è un compito complesso legato a molti settori dell'ingegneria, alcuni dei quali estranei al mio corso di studi, ma è stato portato a termine con successo. Progetto mi ha permesso di confrontarmi per la prima volta con i problemi pratici che si incontrano lavorando in questo ambito. Le serie di problematiche multidisciplinari aumentano la difficoltà dei problemi e hanno richiesto una lunga fase di documentazione e ricerca.

Il lavoro applicato al progetto è stato orientato a sistemare progressivamente prima i problemi meccanici, poi i problemi elettronici e infine quelli di controllo e software, cercando di poter lavorare solamente in un campo per volta senza incertezze sul funzionamento del resto del sistema. La parte l'elettronica è stata oggetto di particolari attenzioni grazie alla competenza ottenuta nel mio corso di studi, ma con la consapevolezza che per raggiungere l'obiettivo della stabilità tutte e tre le componenti devono funzionare correttamente.

La pulizia dei segnali e la stima dell'angolo sono stati i problemi principali nel progetto svolto, per supplire al problema si è lavorato sia sotto il profilo meccanico, riducendo le vibrazioni, sia sotto il profilo elettronico, adattando i segnali al range dell'ADC, sia sotto il profilo del controllo, cambiando il sistema di filtraggio; riuscendo ad ottenere delle uscite stabili e prive di disturbi.

Il progetto realizzato, raggiungere la stabilità con un sistema low cost, a seguito di un'ulteriore evoluzione futura può la possibilità ad altre tesi future di fare da parte motrice per altri robot.

A seguito del lavoro svolto posso inoltre affermare di aver consolidato le capacità pratiche riguardanti il mondo dell'elettronica, di essermi affacciato al mondo della robotica e di aver appreso una metodologia di lavoro. Posso pertanto ritenermi pienamente soddisfatto del lavoro svolto, sia sotto l'aspetto pratico di realizzazione del progetto che, cosa più importante, a livello di crescita personale.

## 7.2 Sviluppi futuri

Questa tesi è un punto di arrivo del progetto, ma una tappa intermedia che lascia spazio a migliorie in tutti i campi affrontati. Analizziamo ora alcuni sviluppi possibili del robot che rendano possibile una migliore stabilità e una migliore accessibilità dei dati.

### Sviluppi meccanici

Un possibile sviluppo da effettuare è quello del comparto meccanico; uno dei limiti più importanti del progetto è la struttura di Tilty la quale non sembra ottimale: le scelte dei materiali e della struttura rendono il robot molto pesante per le sue dimensioni limitando la possibilità di movimento del robot stesso. Si registrano poi non perfetti allineamenti della struttura che producono attriti e vibrazioni soprattutto in prossimità degli alberi motore.

### Sviluppi elettronici

La parte elettronica del progetto è stata ampiamente rivista e trattata, ma robot stabile si è notato che l'utilizzo della porta seriale come trasferimento dati risulta scomodo e antifunzionale: il cavo che collega il robot al pc infatti introduce la necessità di compensazione di altre forze in una situazione già critica, sarebbe quindi più indicato prevedere un trasferimento dei dati wireless attraverso dei moduli Xbee. Questi moduli sono di particolare facilità d'uso, di piccole dimensioni e sono già stati largamente utilizzati in laboratorio con notevole successo. L'utilizzo di tale soluzione renderebbe il robot un sistema isolato e capace di muoversi a distanza dall'utilizzatore, che comunque potrebbe controllare i dati e monitorare la situazione. Interessante sarebbe poi che il sistema fosse capace di rilevare la carica della batteria in modo da segnalarlo all'utente ed evitare che a seguito della perdita di potenza il robot cadesse, con la possibilità di rovinare il robot stesso e l'attrezzatura montatagli sopra.

### Sviluppi software

Il traguardo della stabilità del sistema apre molteplici sviluppi software sia dal punto di vista firmware, sia dal punto di vista di analisi dei dati. Il componente principale, che necessita di ulteriore sviluppo, è sicuramente il regolatore: quello implementato in questa tesi è un banale regolatore proporzionale, che non riesce a rendere asintoticamente stabile il robot. Sarebbe interessante vedere come si comporta il sistema inserendo un altro tipo di regolatore, come ad esempio un PID. Importante sarebbe anche riuscire a controllare la velocità media del robot al fine di fargli eseguire un percorso precedente implementato o deciso esternamente dal sistema.



Un passaggio obbligato per lo sviluppo del robot è l'attivazione della comunicazione bidirezionale dei dati attraverso la porta seriale o eventualmente un altro ingresso di futura implementazione. Attraverso questa comunicazione controllare poi i movimenti del robot, questo si rende necessario se, come voleva essere l'idea alla base del progetto, il robot deve essere la parte motrice di altri progetti, che devono avere la possibilità comandare il loro movimento.

Lavorando nella stessa direzione sarebbe importante una migliore interfaccia su un terminale, quella attuale, basata su MATLAB è di pesante implementazione e scarna di informazione. L'attuale non consente di controllare i dati in tempo reale, ma necessita di eseguire prima lo scaricamento dei dati, poi l'elaborazione e in ultimo la visualizzazione grafica. Sarebbe interessante visualizzare i dati in tempo reale e avere la possibilità di regolare particolari comportamenti del robot da terminale

Sarebbe poi possibile l'inserimento di altre features di auto calibrazione del robot al fine di risolvere alcune problematiche riscontrate, come ad esempio l'auto taratura dello zero e l'auto taratura dei motori. L'auto taratura dello zero servirebbe a sopperire a quel lavoro manuale che va fatto se l'accelerometro posto sul robot viene spostato dalla sua posizione, anche di pochissimi gradi. Lo spostamento del sensore fa cambiare il valore dell'ADC associato alla perfetta perpendicolarità del robot con il terreno, questo comporta un errata valutazione della posizione del robot e quindi una deriva del sistema verso un lato. Con una particolare routine o con un tasto si potrebbe attivare questa procedura in modo da render il tutto automatico e meno soggetto a errori. L'auto taratura dei motori invece sarebbe utilizza per sopperire alla diversità di risposte e di attriti che ci sono tra i due alberi motori che fanno muovere il robot in una direzione curva, o ruotare su se stesso se lasciato oscillare intorno al punto di equilibrio. Grazie all'utilizzo dei due encoder ottici posti sui motori si può ricercare una funzione in grado di minimizzare questo errore.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Michie E. Dale. Machine Intelligence 2 - BOX An experiment in adaptive control, pp 137-152. Oliver and Boyd, 1968.
- [2] Neuron-like adaptive elements that can solve difficult learning control problems. pages 834–346, 1983.
- [3] Robert Grover Brown, Patrick Y. C. Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering: Solution Manual, pagina 192, J. Wiley, 1992
- [4] di Edward W. Kamen, Jonathan Su, Introduction to Optimal Estimation, Pagina 119 Springer, 1999
- [5] S. M. Bozic, Digital and Kalman Filtering: An Introduction to Discrete-time Filtering and Optimum Linear Estimation, a John Wiley & Sons Inc, 1995
- [6] David P. Anderson. nbot balancing robot. 2003.
- [7] Robert Klang Albert-Jan Baerveldt. A low-cost and low-weight attitude estimation system for an autonomous helicopter.
- [8] Joe: A mobile, inverted pendulum. 2002
- [9] Ted Larson, Bob Allen, 2003
- [10] Steve Hassenplug. Legway. 2002
- [11] Dan Piponi, Equibot
- [12] Larry Barelllo ,Gyrobot, 2002
- [13] T. Blackwell Balancing Scooter Version , Balancing Scooter Version, The Electric Unicycle, Anybots Inc
- [14] Arturo Locatelli. Elementi di controllo ottimo. CittaStudi, 1993
- [15] G. Marro. Controlli Automatici. Zanichelli, 1978
- [16] Alan V Oppenheim Ronald W Schafer, Elaborazione numerica dei segnali, Prentice-Hall 1996
- [17] Foccardi , massa Uguzzoni, Fisica generale , casa editrice ambrosiana, 2001
- [18] Sedra Smith, Circuiti per la micro elettronica, EdiSES, 2005
- [19] Franco Zappa , Rita Zappa, Complementi di elettronica, Progetto Leonardo, 2006
- [20] Giovanni Setti, Manuale di reti di comunicazione e trasmissione dati, Calderini, 1998