



Politecnico di Milano
Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica
Dipartimento di Elettronica e Informazione

Progettazione e realizzazione di una base robotica bilanciante su ruote

Martino Migliavacca

AI & R Lab
Laboratorio di Intelligenza Artificiale
e Robotica del Politecnico di Milano

22 Ottobre 2009

Robot adatti ad operare in ambiente domestico

REQUISITI

- Impronta a terra ridotta
- Capacità di muoversi in ambienti complessi
- Possibilità di interagire con gli oggetti



Robot adatti ad operare in ambiente domestico

REQUISITI

- Impronta a terra ridotta
- Capacità di muoversi in ambienti complessi
- Possibilità di interagire con gli oggetti

ROBOT ANTROPOMORFI

- Intrinsecamente adatti ad operare in ambienti pensati per l'uomo
- Elevato numero di giunti
- Difficoltà di controllo
- Lentezza dei movimenti
- Richieste energetiche elevate
- Carico trasportabile contenuto
- Costi elevati



Robot bilancianti su ruote

VANTAGGI

- Impronta a terra ridotta
- Ridotto numero di attuatori da controllare
- Efficienza energetica
- Possibilità di trasportare carichi elevati



Robot bilancianti su ruote

VANTAGGI

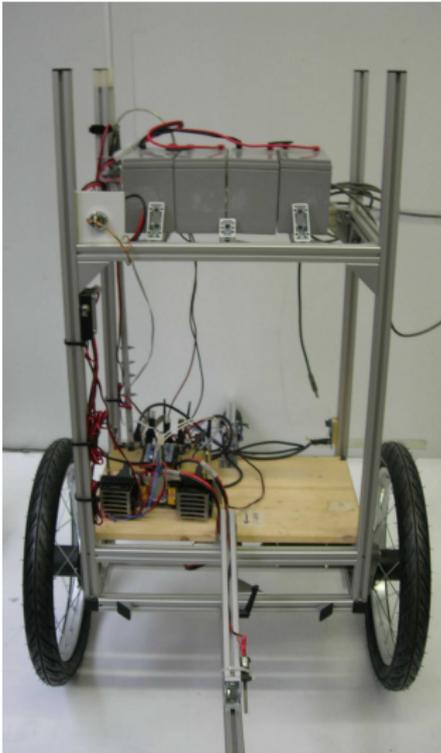
- Impronta a terra ridotta
- Ridotto numero di attuatori da controllare
- Efficienza energetica
- Possibilità di trasportare carichi elevati

LIMITI

- Assenza di equilibrio statico
- Incapacità di superare alcuni ostacoli



Descrizione del lavoro svolto



STUDIO TEORICO

- Descrizione dinamica del sistema
- Stima dell'inclinazione del robot

REALIZZAZIONE DEL ROBOT

- Progetto meccanico
- Progetto elettronico
- Software di controllo

CONTROLLO DEL ROBOT

- Implementazione di controllori classici
- Applicazione di tecniche di apprendimento per rinforzo

Principio del pendolo inverso

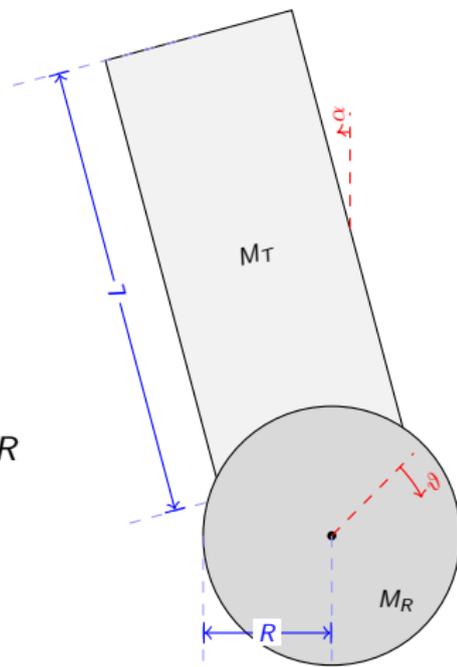
PENDOLO INVERSO SU CARRELLO

- Punto di equilibrio instabile
- Controllo tramite l'azionamento delle ruote

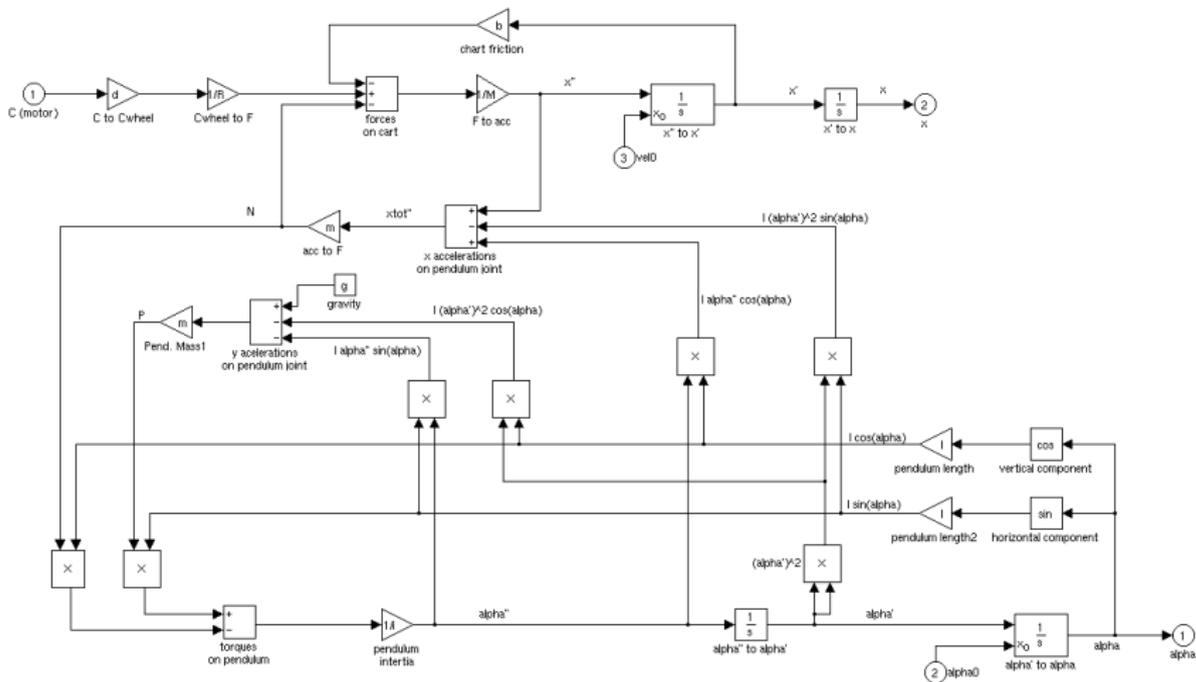
MODELLO DINAMICO

- Bilanciamento delle componenti orizzontali e verticali delle forze
- C rappresenta la variabile di controllo

$$\begin{cases} M_R \ddot{x} + b \dot{x} + M_T \ddot{x} - M_T \frac{l}{2} \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + M_T \frac{l}{2} \ddot{\alpha} \cos \alpha = C/R \\ (I_T + M_T \frac{l^2}{4}) \ddot{\alpha} + M_T g \frac{l}{2} \sin \alpha + M_T \frac{l}{2} \ddot{x} \cos \alpha = 0 \end{cases}$$

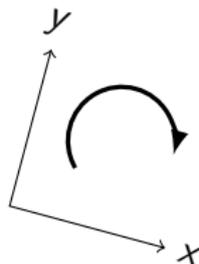
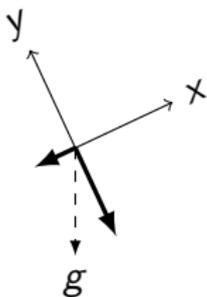
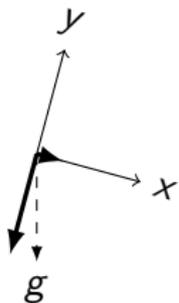


Modello in ambiente MATLAB/SimuLink



$$\begin{cases} M_R \ddot{x} + b \dot{x} + M_T \ddot{x} - M_T \frac{L}{2} \dot{\alpha}^2 \sin \alpha + M_T \frac{L}{2} \ddot{\alpha} \cos \alpha = C/R \\ (I_T + M_T \frac{L^2}{4}) \ddot{\alpha} + M_T g \frac{L}{2} \sin \alpha + M_T \frac{L}{2} \ddot{x} \cos \alpha = 0 \end{cases}$$

Stima dell'inclinazione del robot



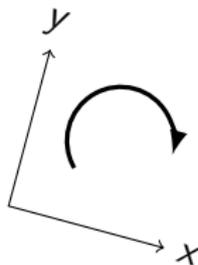
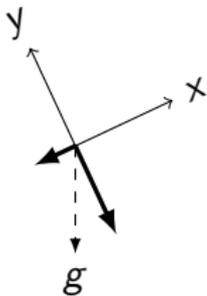
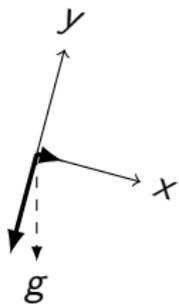
ACCELEROMETRO

- Misura delle componenti dell'accelerazione di gravità
- Per angoli piccoli $\alpha = x$

GIROSCOPIO

- Misura diretta della velocità angolare
- $\alpha = \int \dot{\alpha} dt$

Stima dell'inclinazione del robot



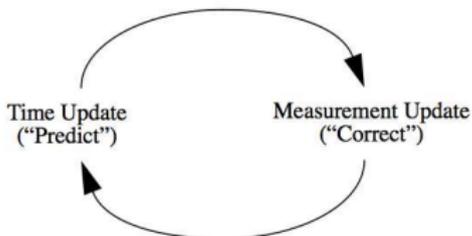
ACCELEROMETRO

- Misura delle componenti dell'accelerazione di gravità
- Per angoli piccoli $\alpha = x$
- Le accelerazioni orizzontali vengono percepite come variazioni dell'inclinazione

GIROSCOPIO

- Misura diretta della velocità angolare
- $\alpha = \int \dot{\alpha} dt$
- Integrando nel tempo la misura dell'angolo è soggetta a deriva

Filtro di Kalman

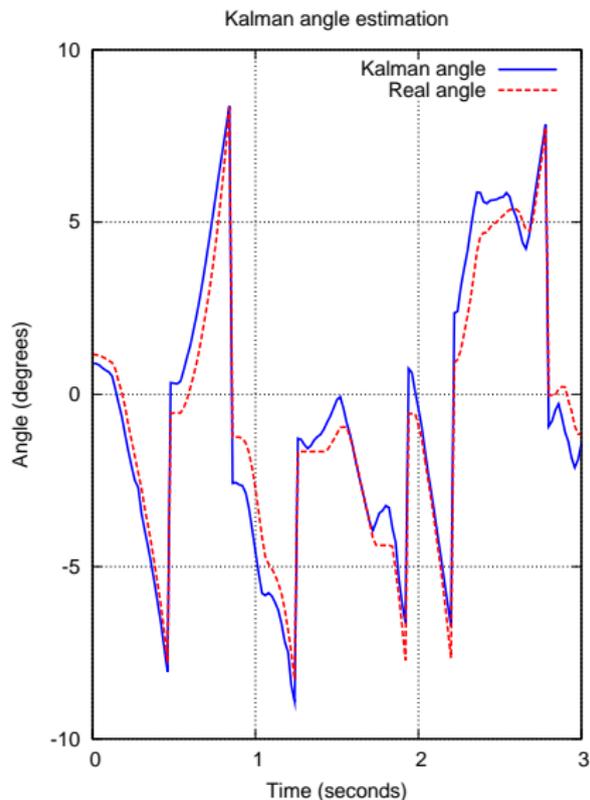


FASE DI PREDICT

- Si sottrarre alla lettura del giroscopio l'offset stimato
- Basandosi sulla velocità angolare attuale si stima l'angolo che il robot assumerà

FASE DI UPDATE

- La lettura dell'accelerometro viene confrontata con l'angolo stimato
- Si aggiorna la stima dell'offset del giroscopio



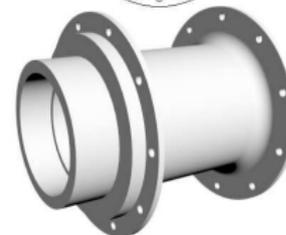
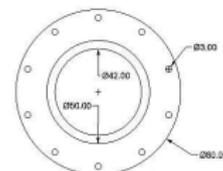
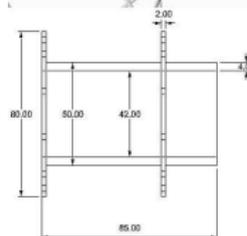
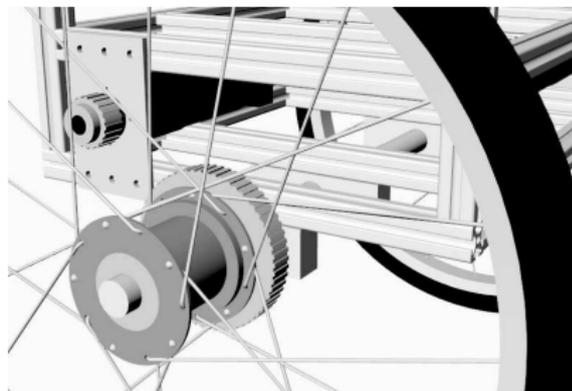
Componenti meccaniche

TELAIO

- Struttura facilmente accessibile e modificabile in futuro
- Possibilità di aggiungere dispositivi accessori
- Utilizzo di profilati modulari in alluminio

TRASMISSIONE

- Ruote da bicicletta del diametro di 14"
- Mozzo progettato e realizzato appositamente
- Trasmissione a cinghia sincrona priva di giochi



Electronica: sensori

ACCELEROMETRO E GIROSCOPIO

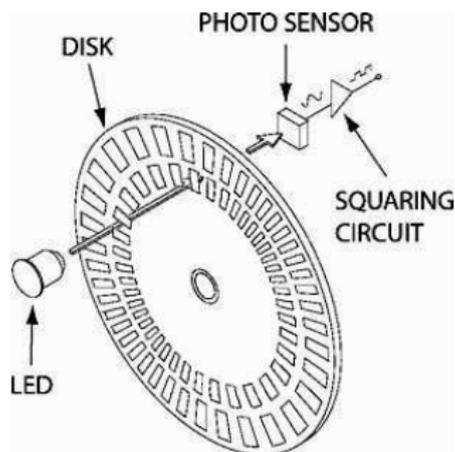
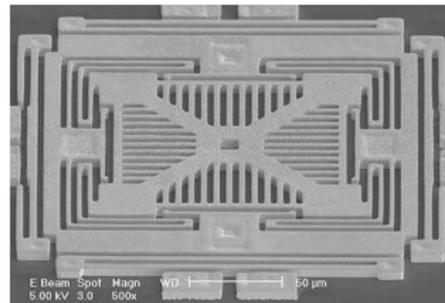
- Struttura MEMS
- Banda 400 Hz
- Uscita analogica

CONDIZIONAMENTO ANALOGICO

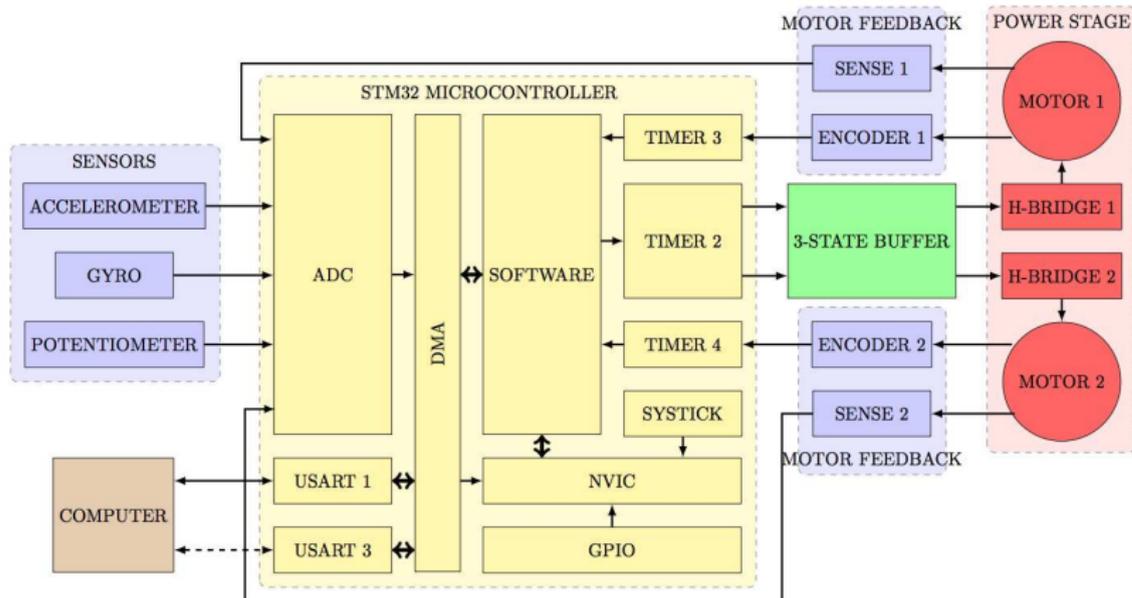
- Filtraggio passa basso
- Amplificazione dei segnali nella regione di interesse
- Annullamento dell'offset

ENCODER OTTICO

- Utilizzato per l'odometria
- Segnali in quadratura
- Risoluzione 2000 tick per giro



Elettronica: microcontrollore



- Acquisizione dei segnali
- Controllo dei dispositivi di potenza
- Esecuzione degli algoritmi di controllo

Ritardo dei sensori

TEST DI CROSS CORRELAZIONE

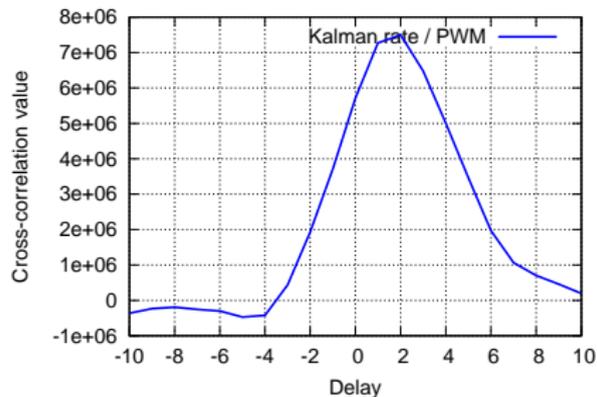
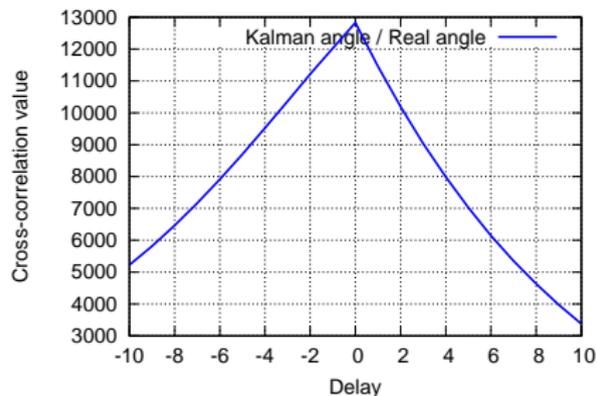
- Confronto tra dato stimato e dato reale
- Indica lo sfasamento tra i due dati

STIMA DELL'ANGOLO

- Picco per sfasamento pari a zero
- Assenza di ritardo

RITARDO TRA AZIONE E MOTO

- Due cicli di ritardo tra applicazione di un'azione e osservazione del suo effetto
- Ritardo dovuto alla dinamica del robot, ineliminabile



Controllo classico: PID

IMPLEMENTAZIONE

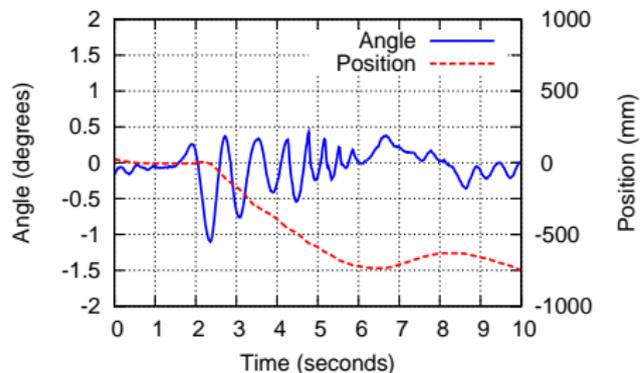
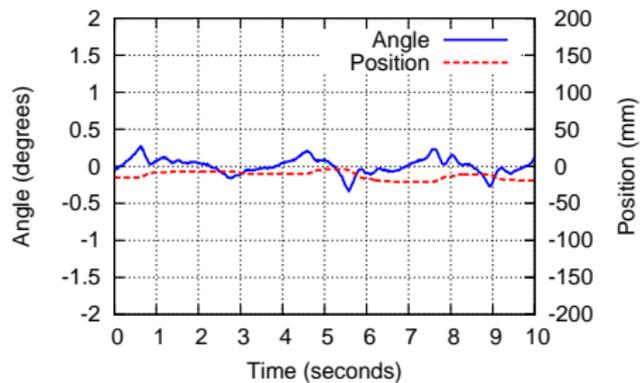
- Realizzazione digitale del controllore PID
- Setpoint di inclinazione

MANTENIMENTO DELL'EQUILIBRIO

- Oscillazioni comprese tra $\pm 0.3^\circ$
- Movimenti compresi tra $\pm 2\text{cm}$

REAZIONE ALLE PERTURBAZIONI

- Sollecitazione in $t = 2\text{s}$
- Oscillazione massima pari a 1°
- Spostamento pari a 0.75m



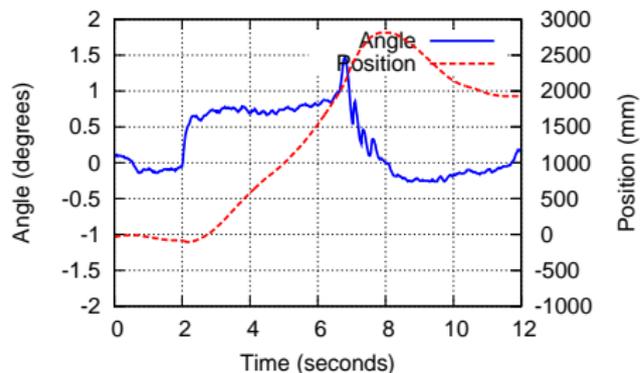
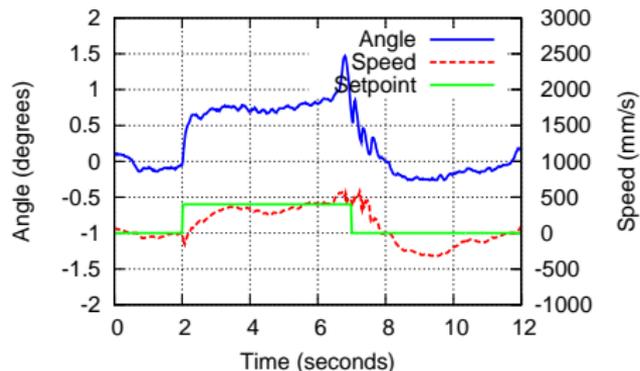
Controllo classico: LQR

IMPLEMENTAZIONE

- Controllo basato su tutte le 4 variabili di stato
- È possibile impostare un setpoint di posizione o velocità

GRADINO DI VELOCITÀ

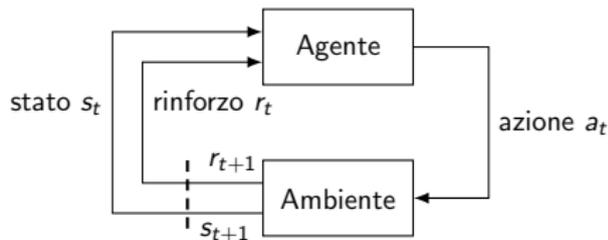
- Setpoint $\dot{x} = 0.4m/s$ in $t = 10s$
- Velocità raggiunta in 1 secondo
- Setpoint $\dot{x} = 0m/s$ in $t = 14s$
- Robot fermo in 2 secondi



Controllore RL: apprendimento per rinforzo

APPRENDIMENTO PER RINFORZO

- Interazione con l'ambiente
- In seguito alle azioni intraprese si riceve un premio o una punizione (rinforzo)
- L'algoritmo tende a scegliere le azioni con rinforzo maggiore



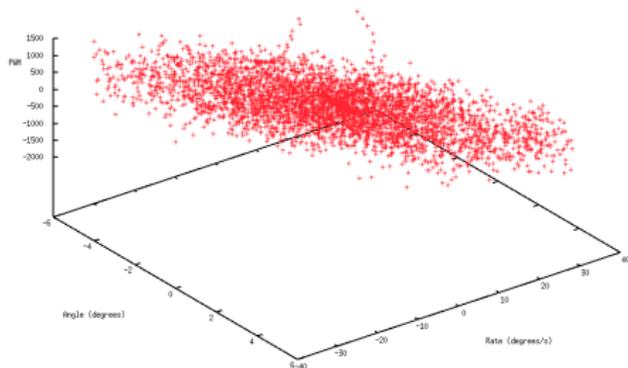
ALGORITMO FITTED Q-ITERATION

- Algoritmo di *Temporal-Difference learning*
- Massimizzazione del rinforzo atteso
- Nella versione *off-line* permette di generalizzare gli stati visitati
- Apprendimento anche con un insieme ridotto di dati

Controllore RL: implementazione

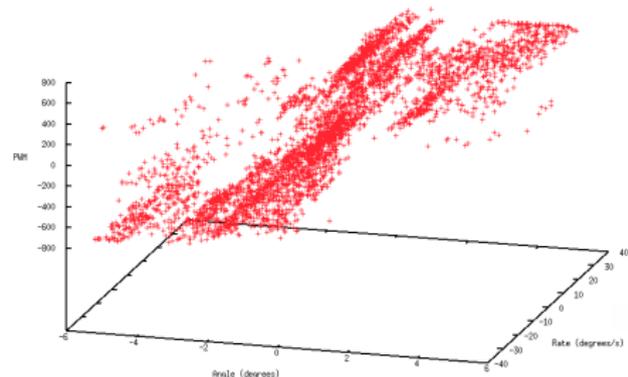
ESPLORAZIONE

- Robot sottoposto ad azioni casuali
- Si registra il valore delle variabili di stato
- Vengono identificati i cambiamenti di stato in seguito alle azioni intraprese



ADDESTRAMENTO

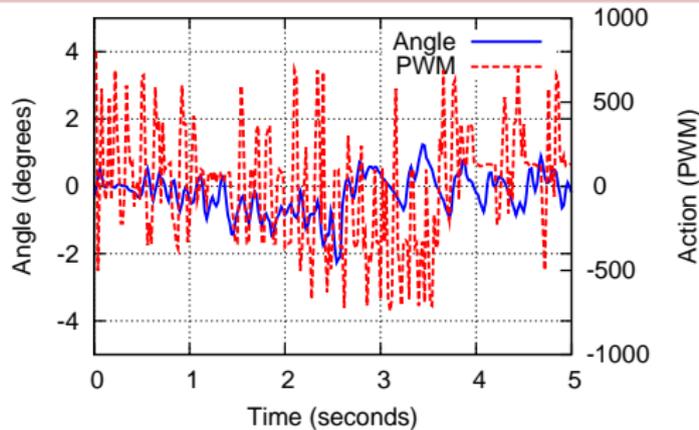
- Si assegna un rinforzo ($r = -\alpha$)
- L'algoritmo FQI identifica per ogni stato le azioni con rinforzo maggiore sul lungo periodo
- Si ricava una politica di controllo
- È possibile reiterare il procedimento



Controllore RL: risultati

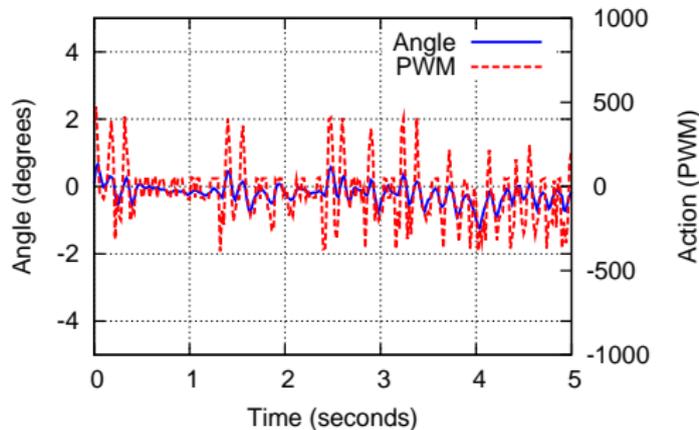
PRIMO ADDESTRAMENTO

- Dataset composto da 1000 punti
- Politica di controllo in grado di mantenere l'equilibrio
- Velocità lineari elevate non raggiunte durante l'esplorazione
- Azioni molto brusche



ITERAZIONI SUCCESSIVE

- L'algorithmo esplora stati mai visitati prima
- Le azioni diventano meno brusche
- Già alla terza iterazione (3000 punti) il comportamento migliora



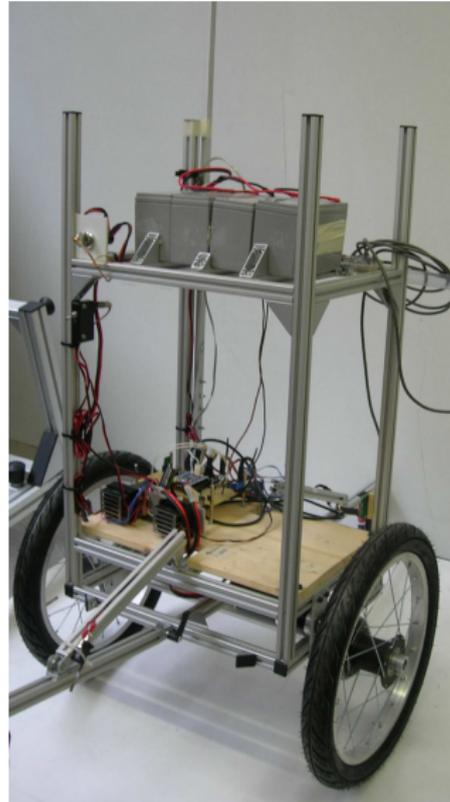
Conclusioni

REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO

- Prototipo funzionante
- Implementazione di differenti algoritmi di controllo

RISULTATI OTTENUTI

- Stima corretta dell'inclinazione
- Mantenimento dell'equilibrio
- Possibilità di inseguire un profilo di velocità
- Apprendimento automatico di una politica di controllo valida



Sviluppi futuri

MOVIMENTO

- Integrazione dei dati odometrici
- Inseguimento di una traiettoria

DISPOSITIVI ACCESSORI

- Sistema di visione
- Algoritmi di navigazione ed evitamento ostacoli
- Interazione con gli oggetti

