



# Sviluppo di sistemi di controllo su piattaforma LEGO Mindstorms

Candidati:

Iacopo Finocchi

Niccolò Monni

Relatore:

Ing. Michele Basso

Correlatori:

Dott. Franco Quercioli

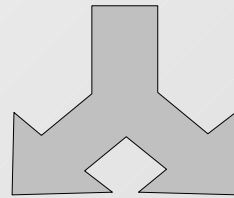
Dott. Massimo Vassalli



# Contesto

Questa tesi si è svolta presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche, nei laboratori dell' Istituto Sistemi Complessi.

## Obiettivi



Analizzare e testare le effettive potenzialità del nuovo sistema LEGO Mindstorms NXT

Effettuare esperimenti di controllo interfacciando il LEGO NXT con un PC esterno.



# Perché NXT?

- E' un dispositivo economico
- E' diffuso in molti laboratori di didattica/ricerca a livello internazionale, data la sua flessibilità e semplicità di utilizzo.
- Risalta le caratteristiche degli algoritmi di controllo che devono sopperire alle carenze tecniche della struttura e dei sensori.



# Mindstorms RCX



# Mindstorms NXT



# Mindstorm NXT

- 4 sensori e 3 attuatori nel kit base
- Processore a 32bit, classe ARM7 (multitasking)
- 256Kb di memoria flash
- 64Kb RAM
- Connettività bluetooth
- Porta USB 2.0



# Sensori

Rotazione



- Scarsa sensibilità (circa 22 gradi)
- Difficoltà di unione con i nuovi componenti LEGO
- Unico sensore di rotazione a disposizione

Luce

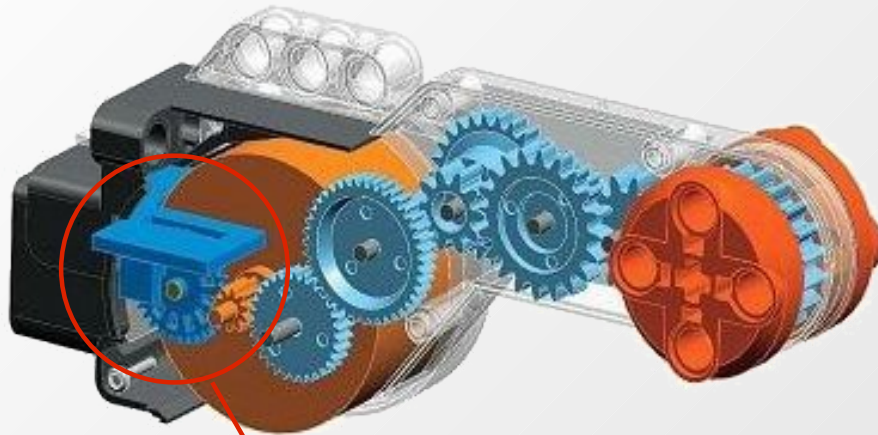


- Buona sensibilità
- Collegamenti semplici
- Molto influenzato dai disturbi esterni (luce solare, neon, etc)





# Attuatori



- Velocità massima funzione del carico applicato, a vuoto 160 giri/min
- Coppia massima 24 Ncm



Encoder

- L'encoder presente nel motore, è l'unico sensore di rotazione ufficiale disponibile per l'NXT

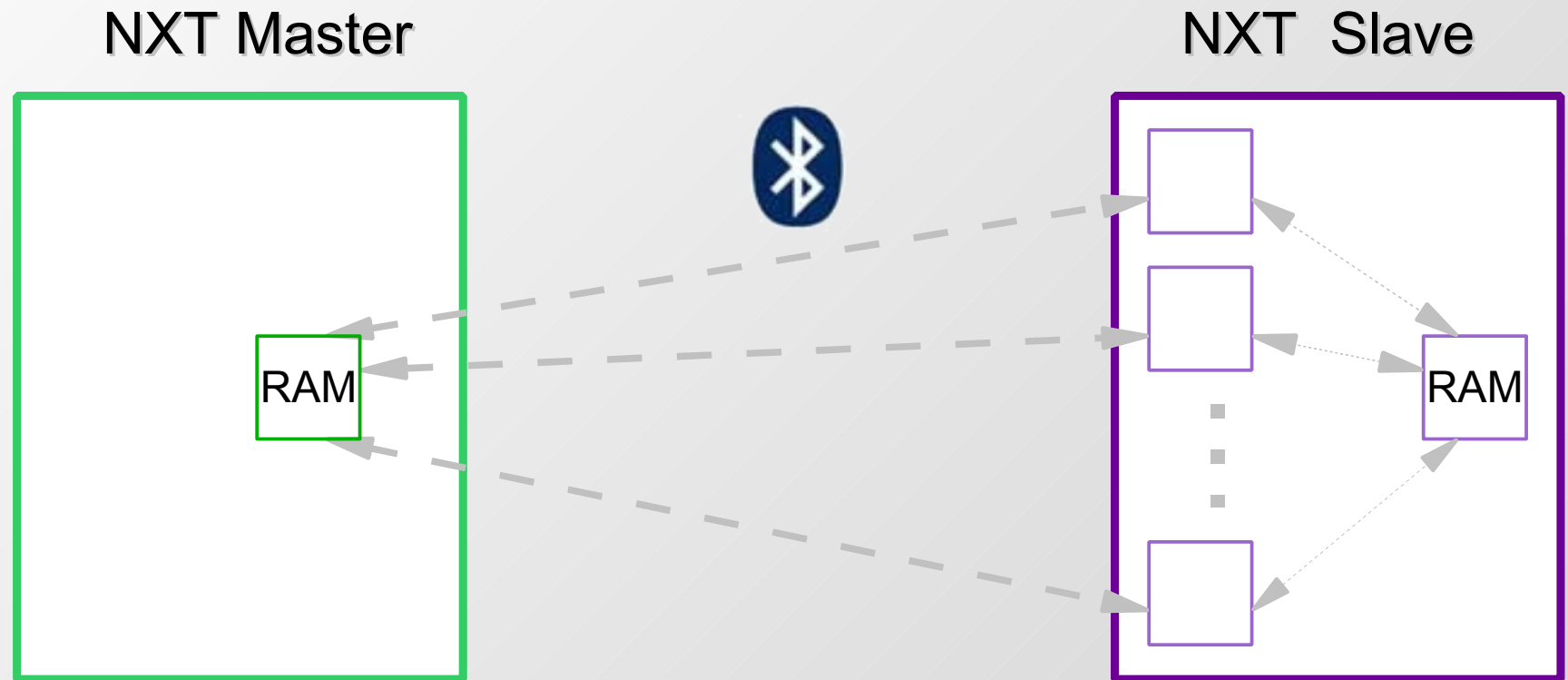


# Comunicazione NXT-PC

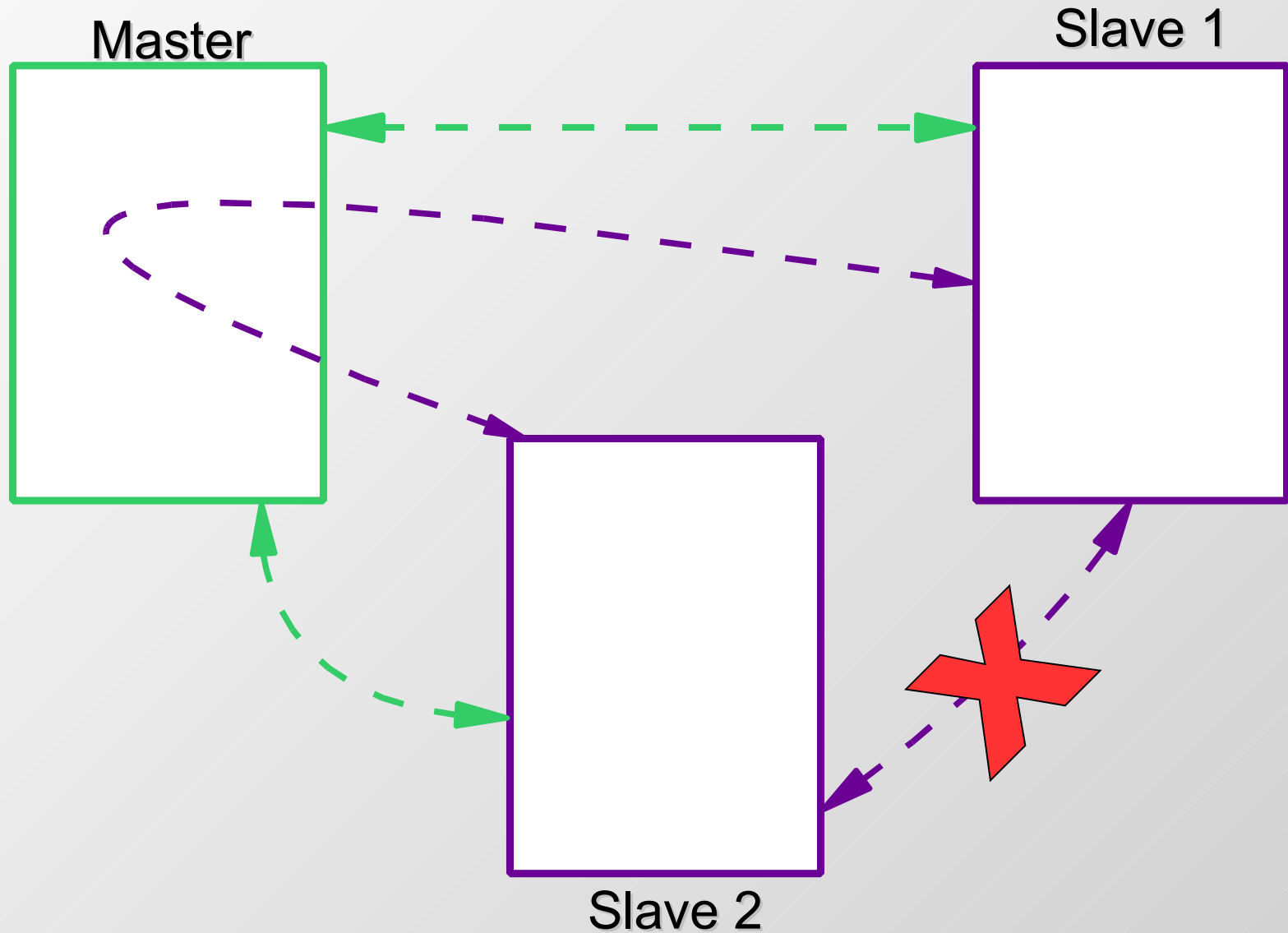




# Comunicazione NXT-NXT

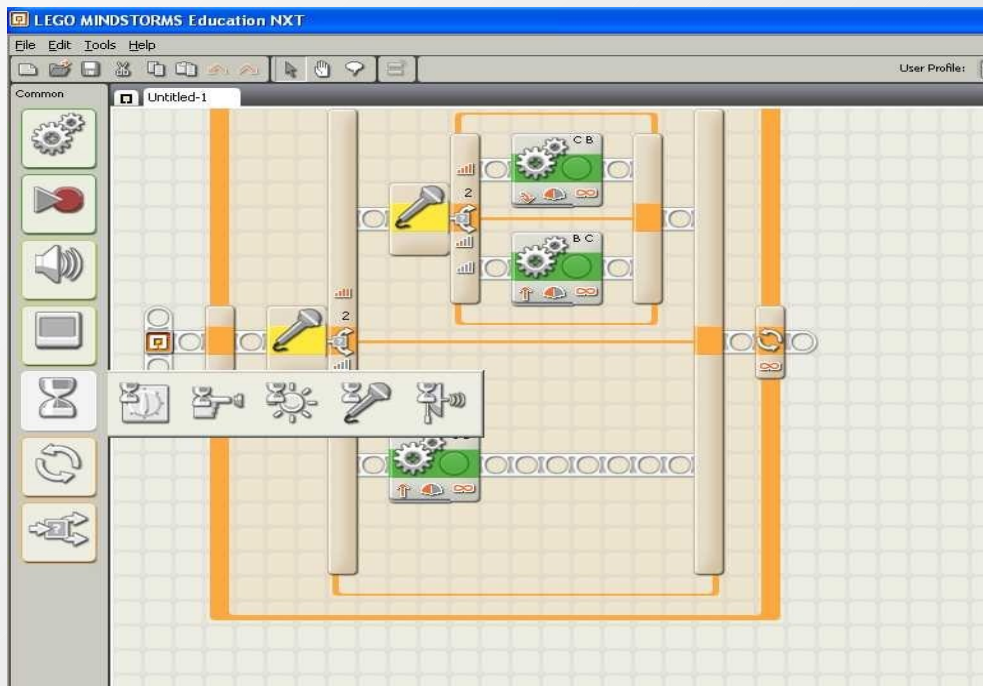


# Comunicazione NXT multipli



# Software

Analisi dei software disponibili (proprietary e open-source)



## Lego NXTG

### Vantaggi

Grafico

Intuitivo

### Svantaggi

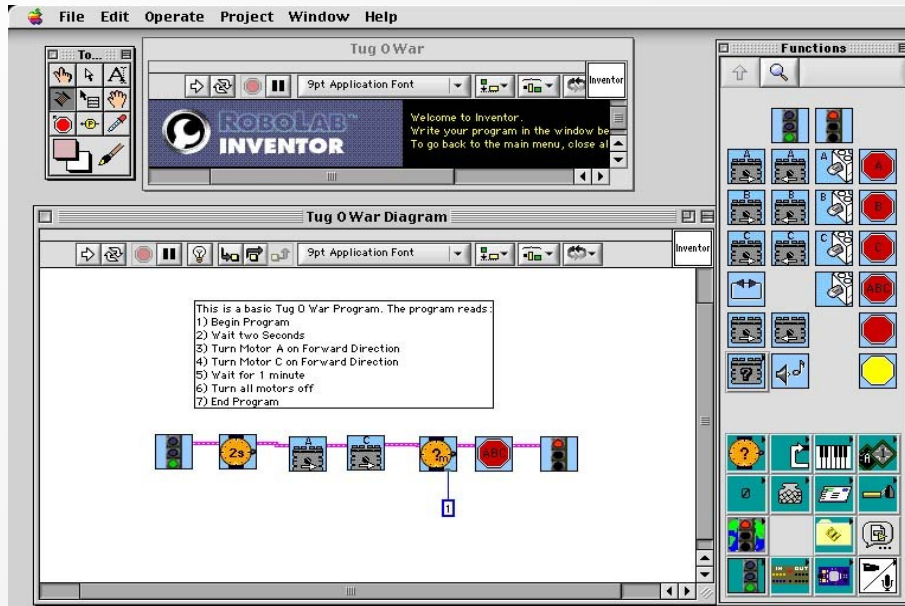
Elavata dimensione dei file prodotti

Libertà di programmazione limitata

Crescita della difficoltà di programmazione con l'aumento dei comandi



# Software



## Robolab

### Vantaggi

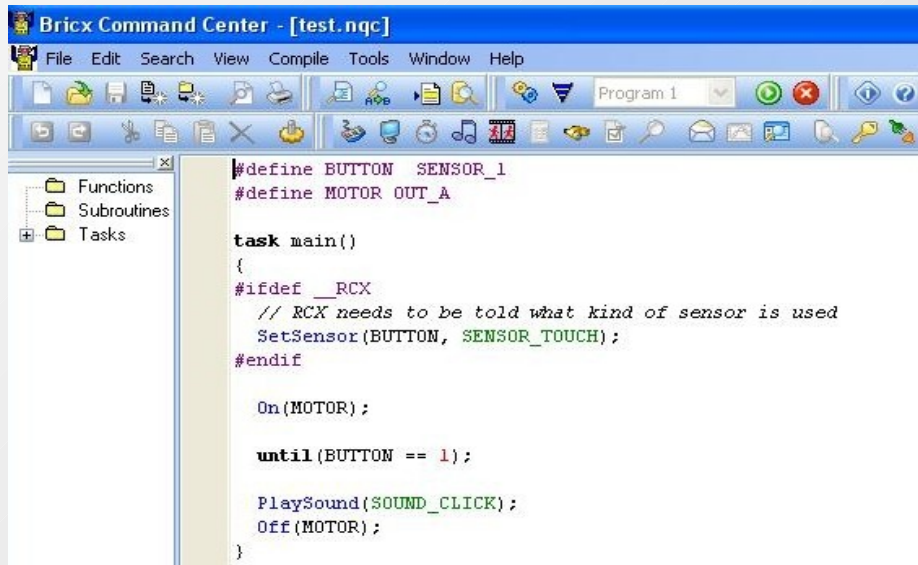
Grafico

Programmazione ad un livello superiore rispetto all'NXTG

Proprio firmware

### Svantaggi

Non è open-source



## Linguaggio NXC

### Vantaggi

Programmazione ad un livello superiore

Multiplatforma

Open-source

Derivato dal linguaggio C

### Svantaggi

Non grafico

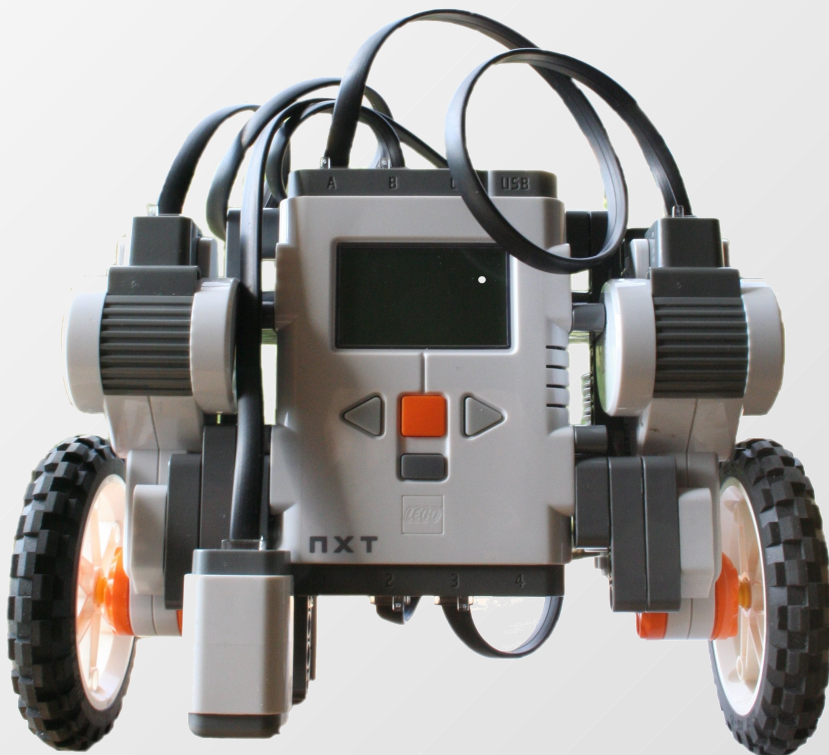
# Software

Le specifiche per un utilizzo avanzato sono:



# Esperimenti svolti

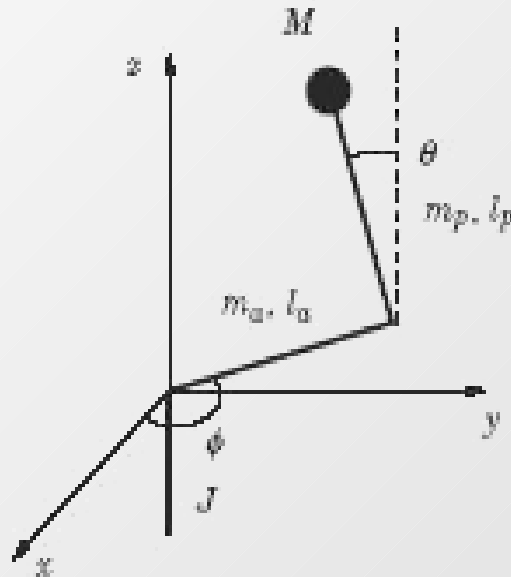
## Pendolo di Furuta



## Legway



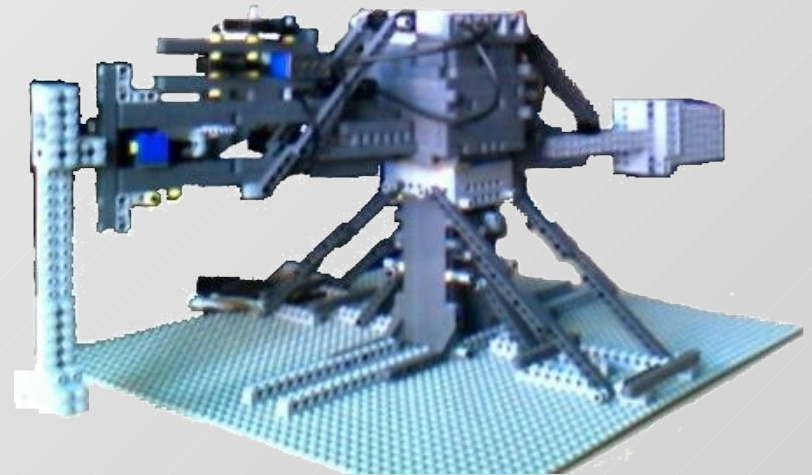
# Pendolo di Furuta



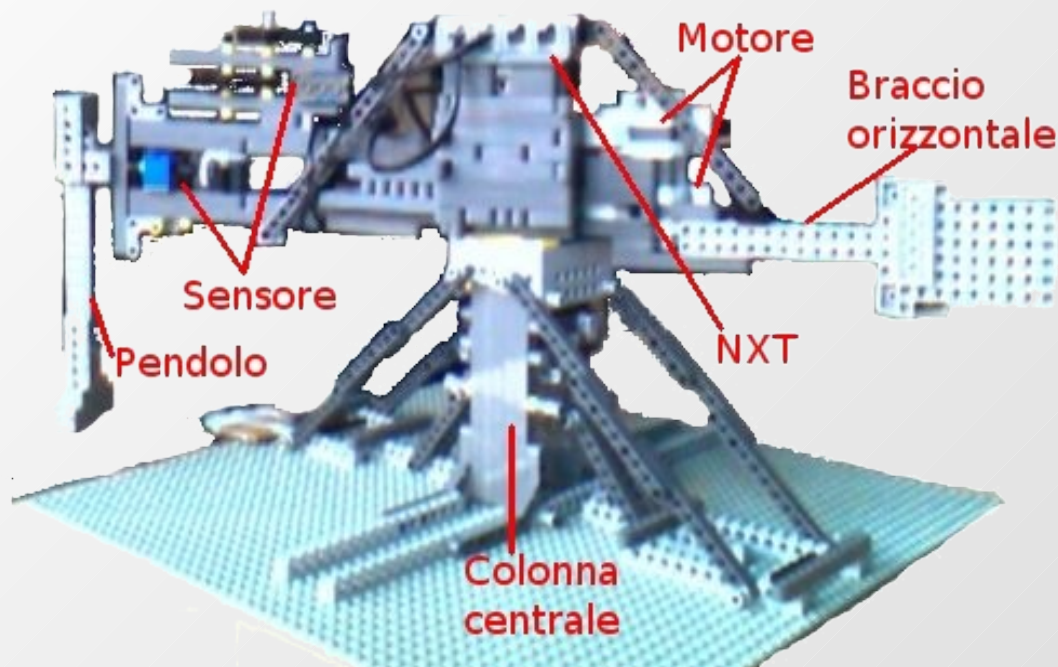
Un particolare tipo di pendolo inverso, presente in alcuni laboratori di Santa Marta

Caratteristiche:

- Comportamento intuitivo
- Controllo non banale



# Pendolo di Furuta



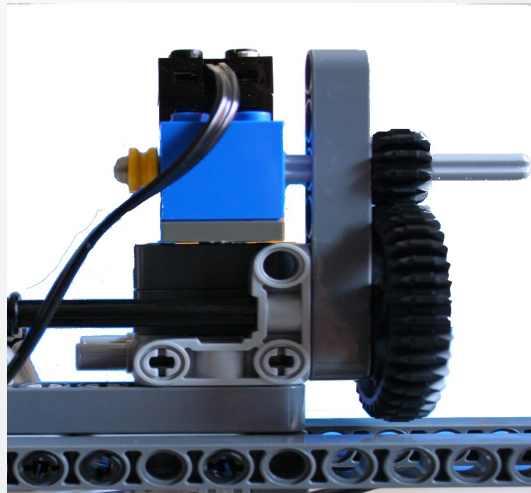
Problematiche della struttura:

- Masse in gioco non trascurabili
- Collegamenti non rigidi
- Torsione della colonna centrale
- Instabilità meccanica
- Sensori inadatti, installazione complessa



# Sensori

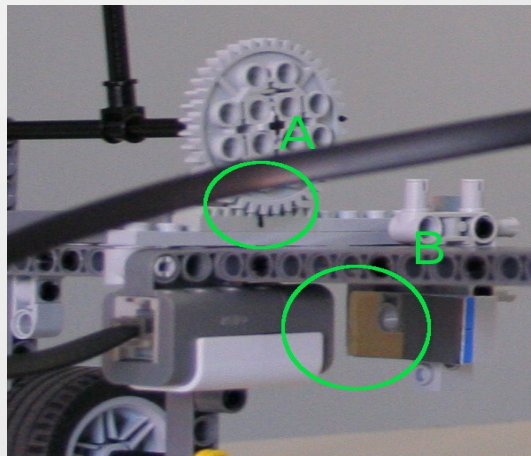
Si cercano accorgimenti per ovviare a queste carenze tecniche:



## Prima soluzione

- Sistemi di ruote dentate per aumentare la sensibilità del trasduttore.
- Sistemi per il collegamento del sensore

## Seconda soluzione



- Accoppiamento ruota dentata-cremagliera, per rendere rettilineo il movimento del pendolo (A)
- Sistemi di specchi per poter sfruttare il sensore di luce (B)

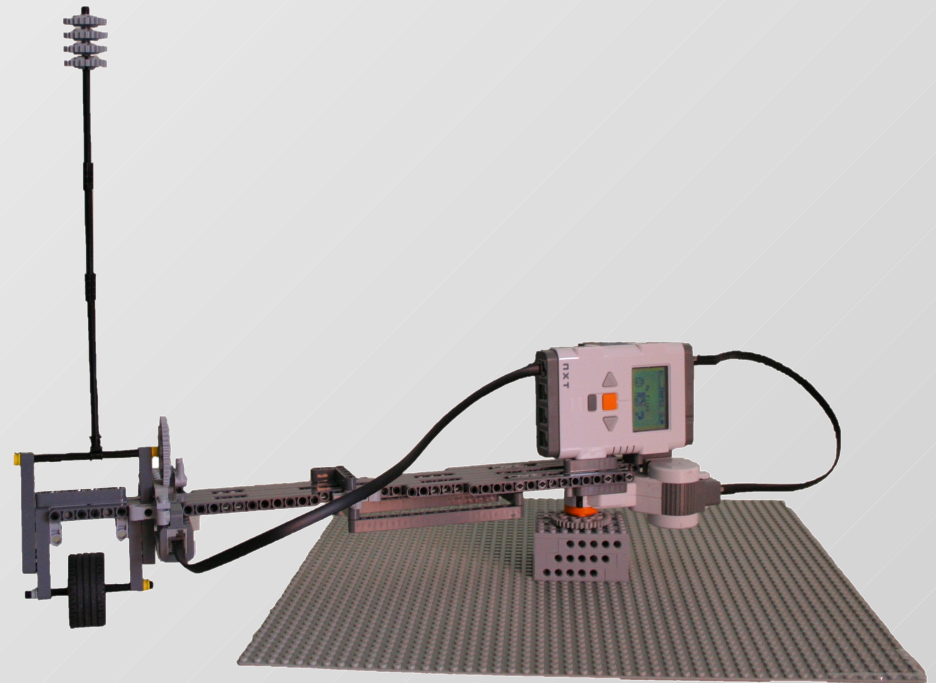


# Pendolo di Furuta

Carenze meccaniche → Nuova struttura

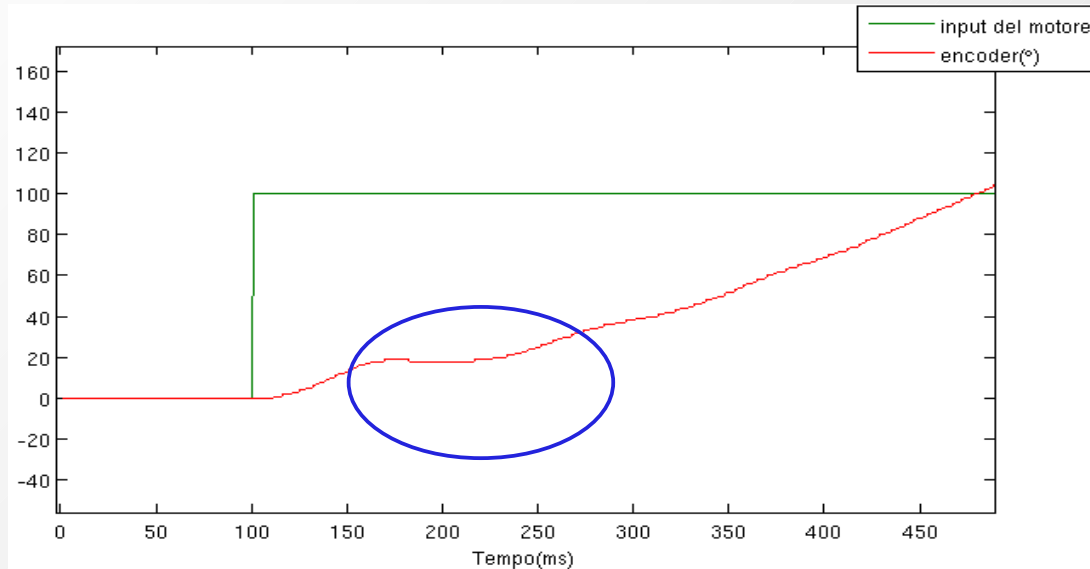
Caratteristiche:

- Più leggera e reattiva
- Assenza della flessione verticale del braccio
- Impossibilitata la rotazione completa del pendolo
- Assenza di una flessione evidente degli elementi
- Dinamica modificabile in funzione della altezza della massa

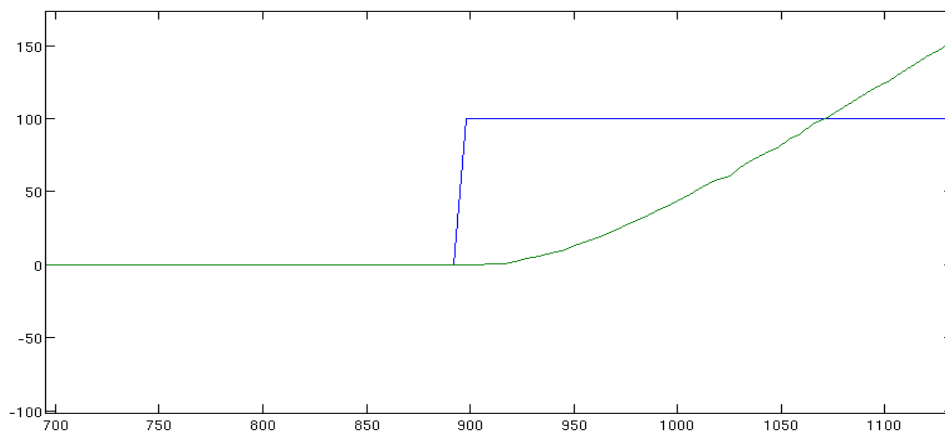


# Pendolo di Furuta

Motore con carico



Motore libero



La presenza di  
fenomeni non  
modellati rende  
instabile la struttura



Abbandono del progetto







# Sviluppo di sistemi di controllo su piattaforma LEGO Mindstorms

Candidati:  
Iacopo Finocchi  
Niccolò Monni

Relatore:  
Ing. Michele Basso

Correlatori:  
Dott. Franco Quercioli  
Dott. Massimo Vassalli





# Legway



Il nome deriva dall'unione delle parole LEGO e Segway, il mezzo di trasporto di recente diffusione.

Il controllo consiste nel mantenere il robot in posizione di equilibrio instabile su due ruote.



# Vantaggi

- Tipologia di controllo simile a quella del pendolo di Furuta
- Dinamica più semplice
- Struttura più compatta e rigida



# Problematiche

- Misurazione affidabile dell'angolo di inclinazione, non eseguibile attraverso l'encoder delle ruote
- Evitare velocità elevate sul piano

## Obiettivo aggiuntivo:

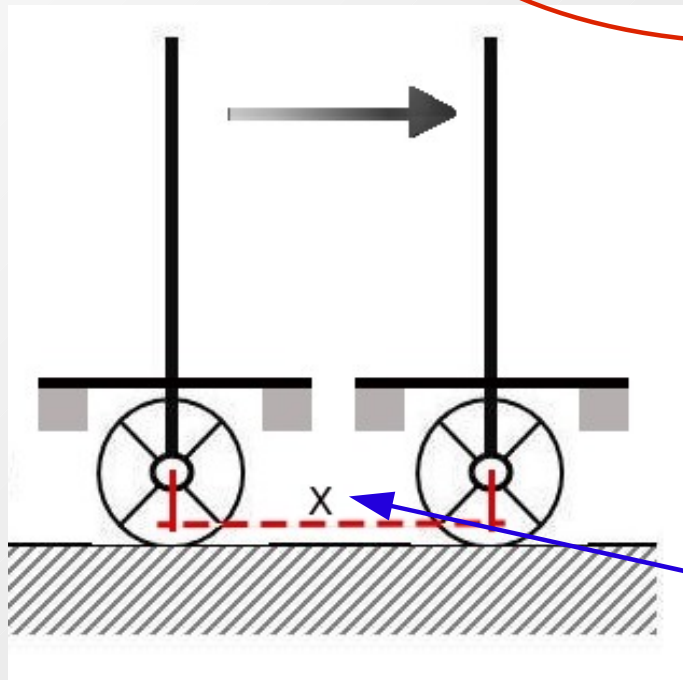
- Controllo remoto



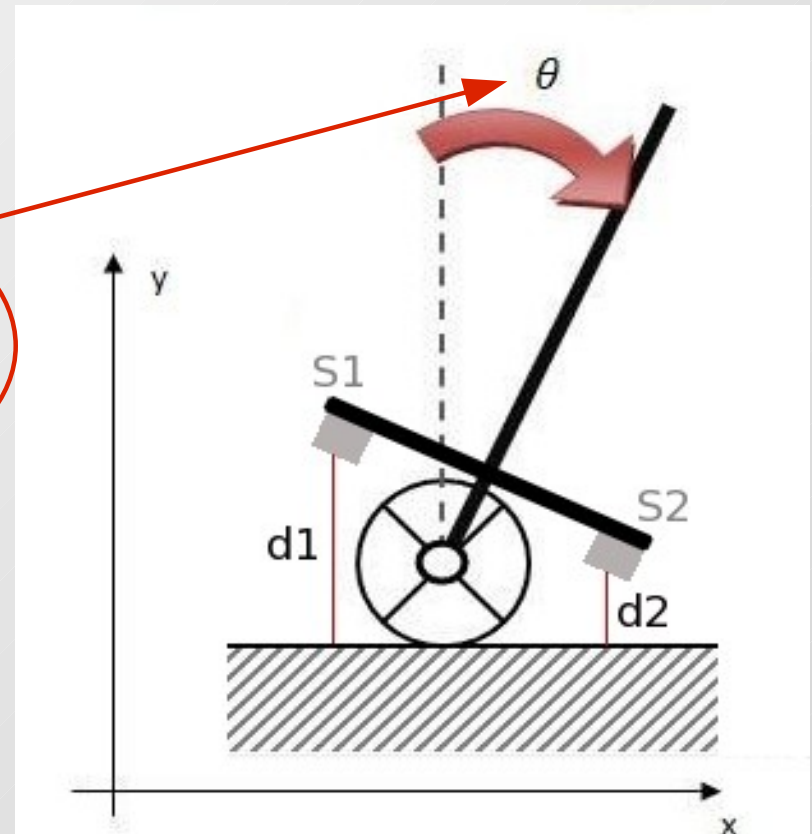
# Variabili di stato

Lo stato del sistema è definito dalle variabili  $\theta, \dot{\theta}, x, \dot{x}$

Angolo di inclinazione  
calcolato con la lettura  
differenziale dei sensori  
S1 e S2



Spostamento sul piano,  
determinato tramite  
lettura dell'encoder delle  
ruote



# Ricostruzione dello stato

## Angolo di inclinazione:

si utilizzano i sensori di luce montati in modo differenziale per migliorare la linearità

$$\theta_k = S1_k - S2_k$$

## Velocità angolare:

rapporto incrementale dell'angolo calcolato rispetto al tempo

$$\dot{\theta}_k = \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T}$$

## Filtro sul rapporto incrementale:

per diminuire l'influenza del rumore

$$\dot{\theta}_k = \alpha \cdot \dot{\theta}_{k-1} + (1 - \alpha) \cdot \dot{\theta}_k$$

## Spostamento sul piano:

si utilizzano gli encoder interni ai motori, trascurando l'inclinazione

$$x_k = r \cdot \phi_k$$

$$x_k = \frac{x_k^{(l)} + x_k^{(r)}}{2}$$

## Velocità sul piano:

rapporto incrementale dello spostamento calcolato rispetto al tempo

$$\dot{x}_k = \frac{x_k - x_{k-1}}{T}$$

## Filtro sul rapporto incrementale:

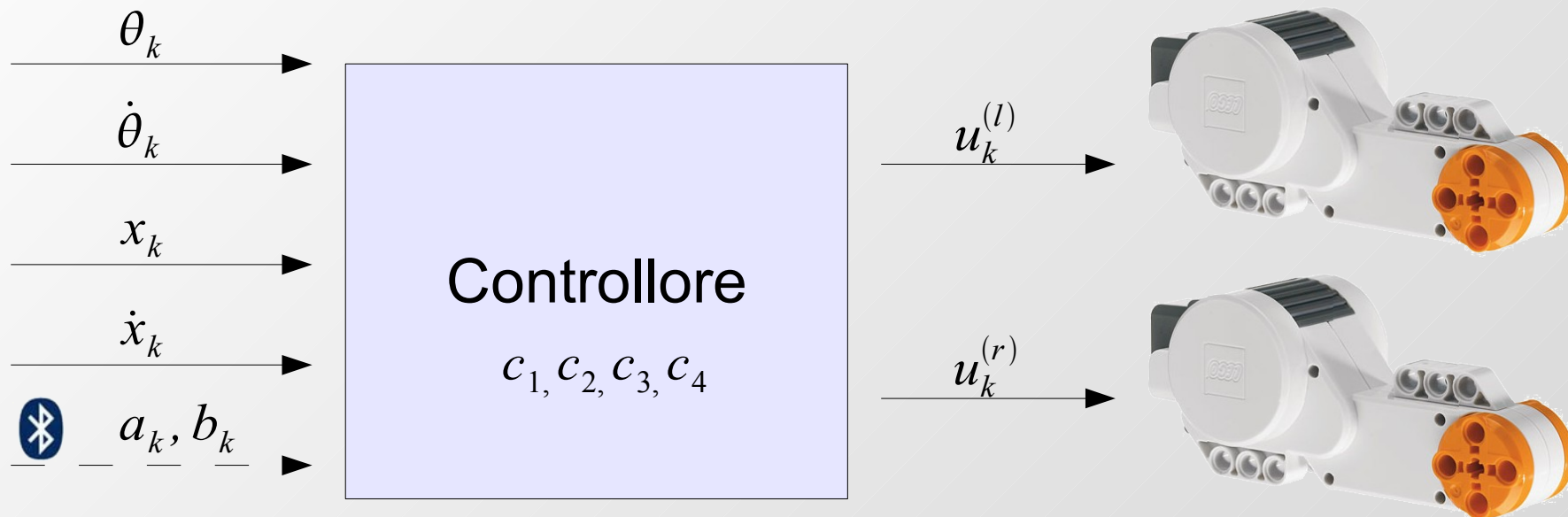
per evitare che le variazioni di inclinazione incidano sulla velocità

$$\dot{x}_k = \beta \cdot \dot{x}_{k-1} + (1 - \beta) \cdot \dot{x}_k$$





# Software di controllo



Controllore:

$$u_k = c_1 \cdot \theta_k + c_2 \cdot \dot{\theta}_k + c_3 (x_k + a_k) + c_4 \cdot \dot{x}_k$$

$$u_k^{(l)} = u_k + b_k$$

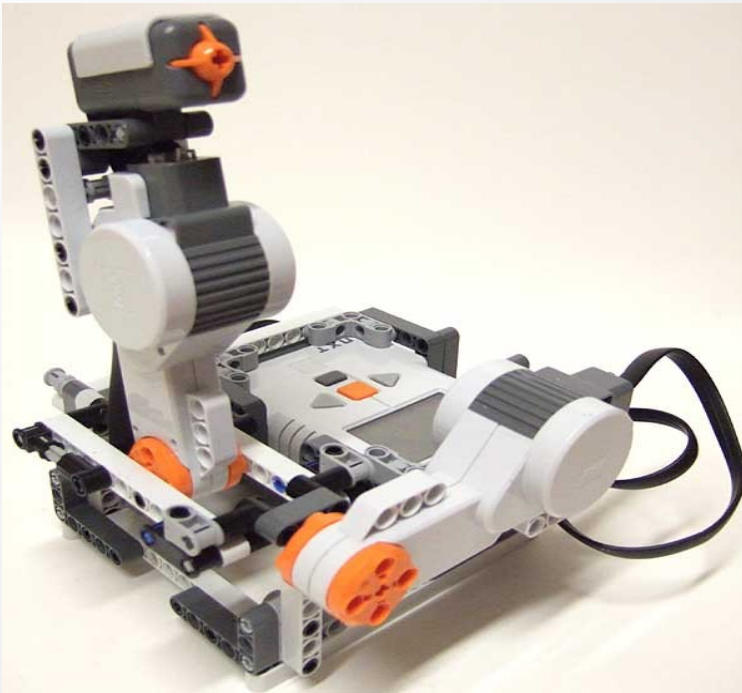
$$u_k^{(r)} = u_k - b_k$$





# Joystick

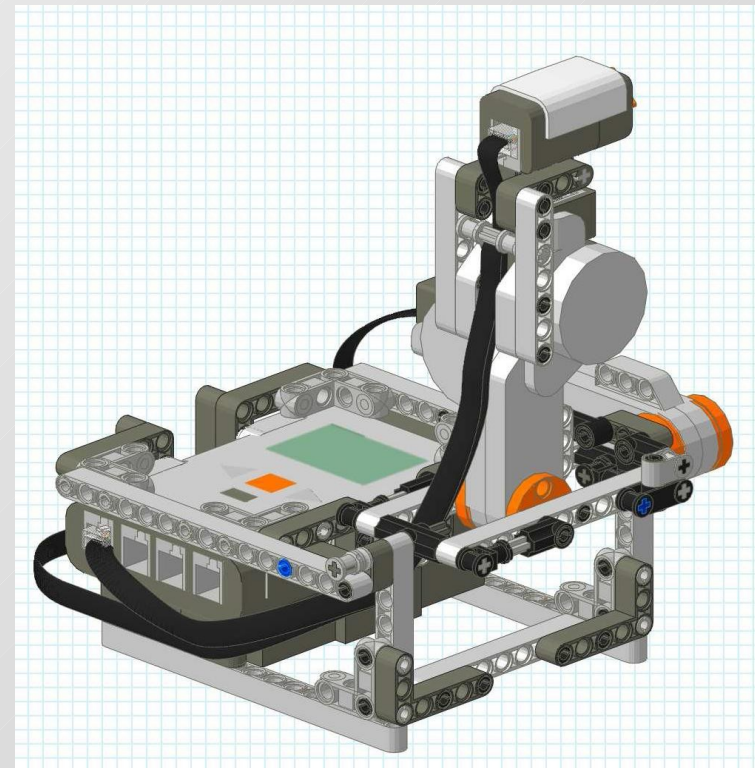
## Controllo del movimento del Legway



### Caratteristiche:

→ Comunicazione bluetooth con il Legway

- Lettura di due rotazioni tramite encoder dei motori
- Possibilità di aggiungere funzioni, tramite pulsanti.



# Generazione dei comandi nel joystick

## **Segnale *a*:**

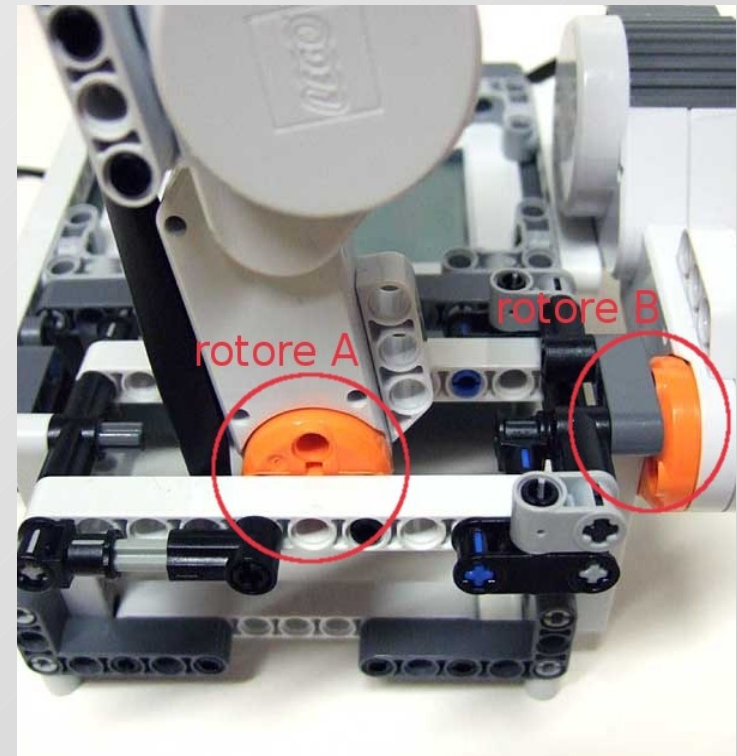
generato con un algoritmo incrementale, con incremento proporzionale alla posizione del rotore A

## **Segnale *b*:**

generato proporzionalmente alla posizione del rotore B

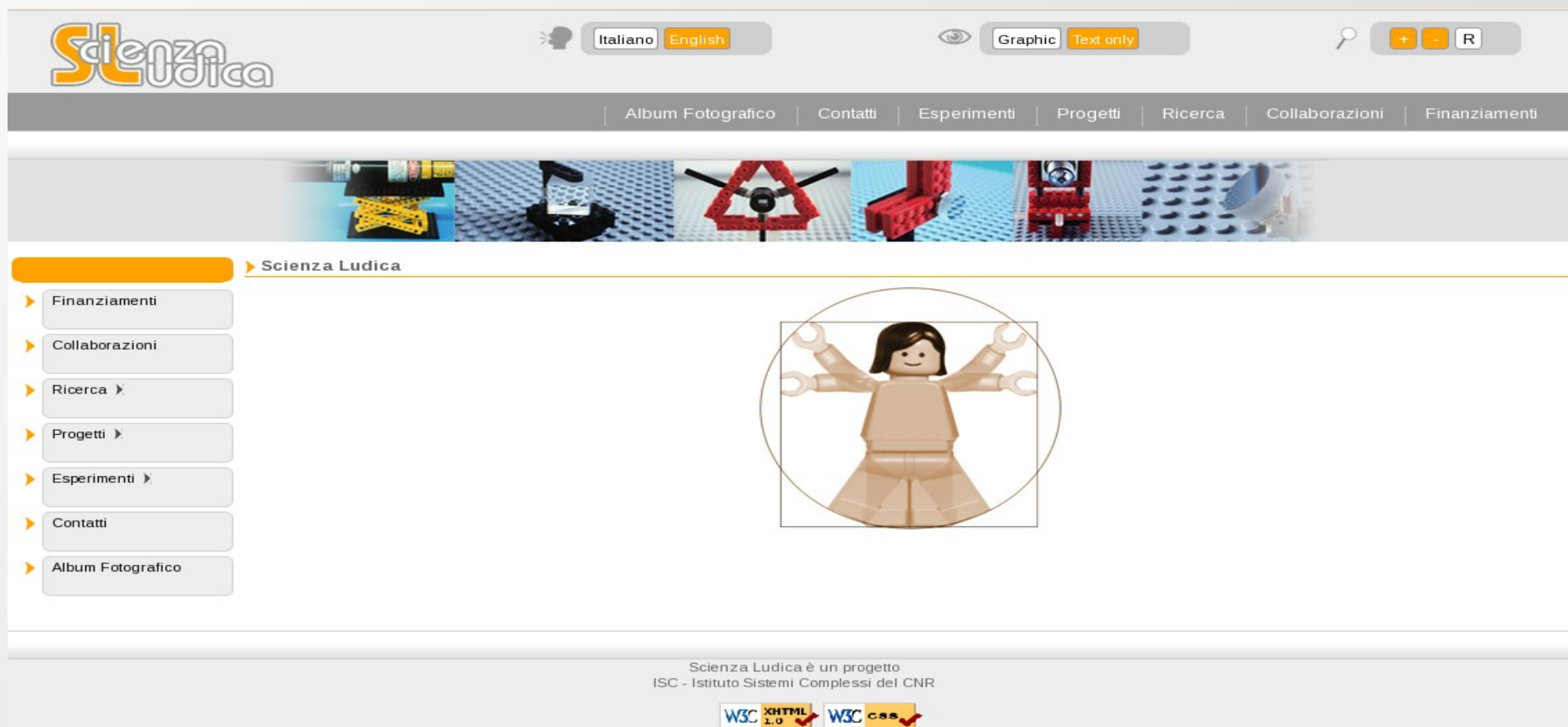
## **Feedback sui rotori:**

il motori generano una coppia che tende a riportarli in posizione iniziale (effetto molla del joystick)



# Scienza ludica

L'Istituto Sistemi Complessi ha creato il sito Scienza Ludica, dove vengono raccolti tutti gli esperimenti sviluppati con il LEGO



[www.scienzaludica.it](http://www.scienzaludica.it)



# Obbiettivi Futuri

- Creare connessioni multiple di più robot, capaci di interagire tra loro.
- Interfacciare l'NXT con Matlab e Simulink al fine di creare esperimenti real time con modalità corrispondenti a quelle dei laboratori di Santa Marta di automatica.
- Utilizzo di Mindstorms nei laboratori didattici universitari per lo sviluppo di sistemi di controllo

