



Algoritmi e Robotica

Egidio Falotico

The BioRobotics Institute, Scuola Superiore Sant'Anna,
Pisa, Italy

IL PENSIERO COMPUTAZIONALE

Percorso Formativo per i Docenti della Scuola Secondaria di Secondo Grado – Università di Pisa



PARLIAMO DI ROBOTICA

SCOPRI L'EDIZIONE 2021

Il pensiero computazionale, Pisa – 18 Novembre 2021

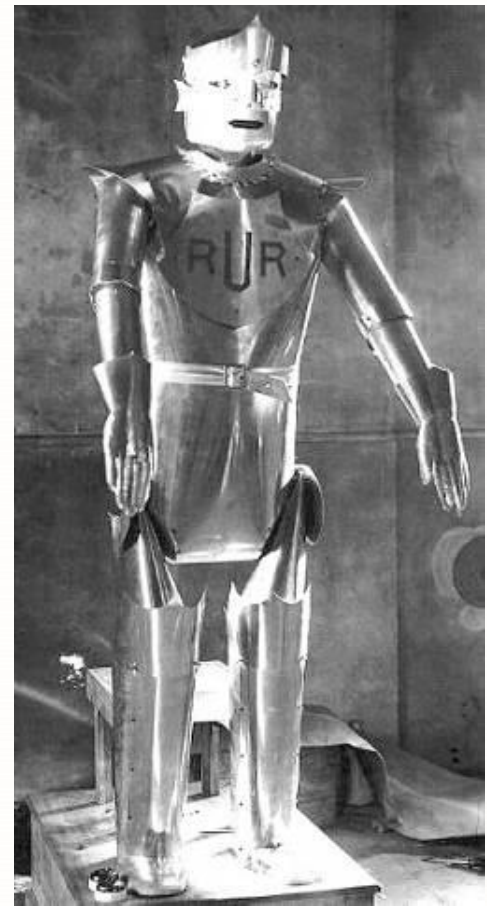


Etimologia del termine “robot”

Il termine **robot** fu usato per la prima volta dallo scrittore ceco **Karel Čapek**, nel 1920 nel suo romanzo *R.U.R.* (*Rossum's Universal Robots*). Deriva dal termine ceco **robota**, che significa "lavoro pesante" o "lavoro forzato".

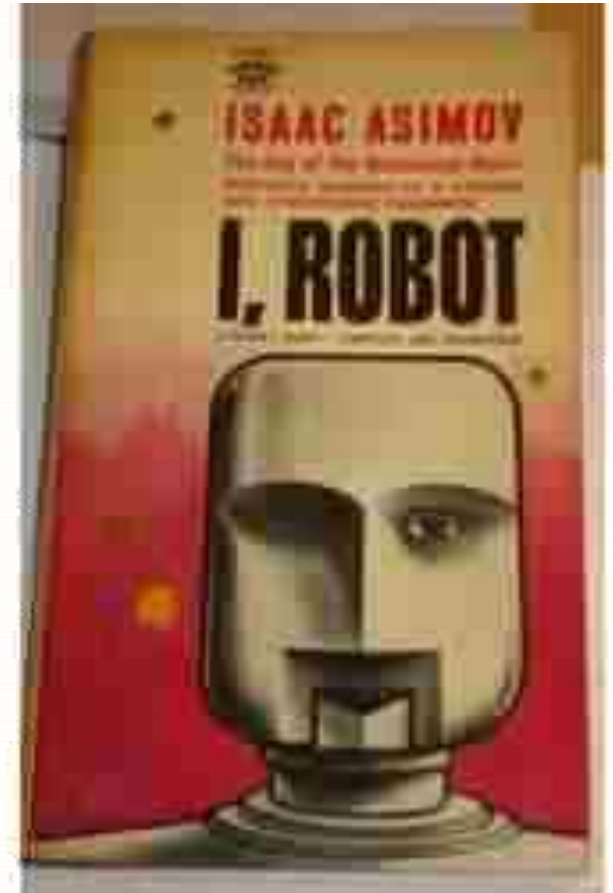
In realtà il vero inventore della parola *robot* fu il fratello di Karl Čapek, Josef, anche lui scrittore e pittore cubista, il quale utilizzò la parola “**automat**”, (automa), in un suo racconto del 1917, *Opilec* (“L'ubriacone”).

Il termine greco *autòmaton* significa “che si muove da sé”.

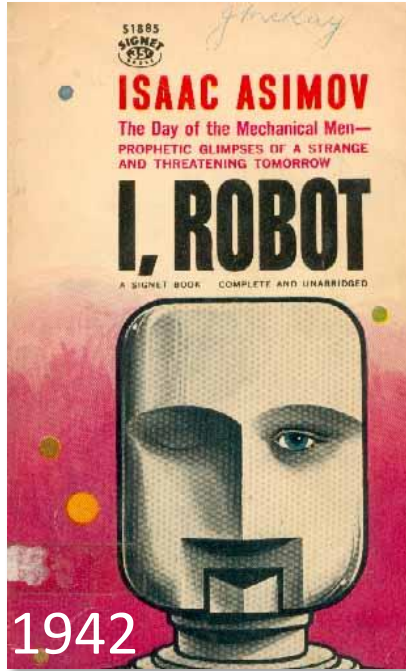


Etimologia del termine “robotica”

- Il termine **robotica** venne usato per la prima volta (su carta stampata) nel racconto di **Isaac Asimov** intitolato *Circolo vizioso* (*Runaround*, 1942), presente nella sua famosa raccolta *Io, Robot*.
- In esso, egli citava le **tre leggi della robotica**.



Le origini della robotica moderna



Le origini della robotica moderna



UNIMATE, il primo robot industriale (brevettato nel 1954)

Nel 1960 il primo robot industriale fu installato presso un impianto produttivo General Motors in New Jersey (USA)

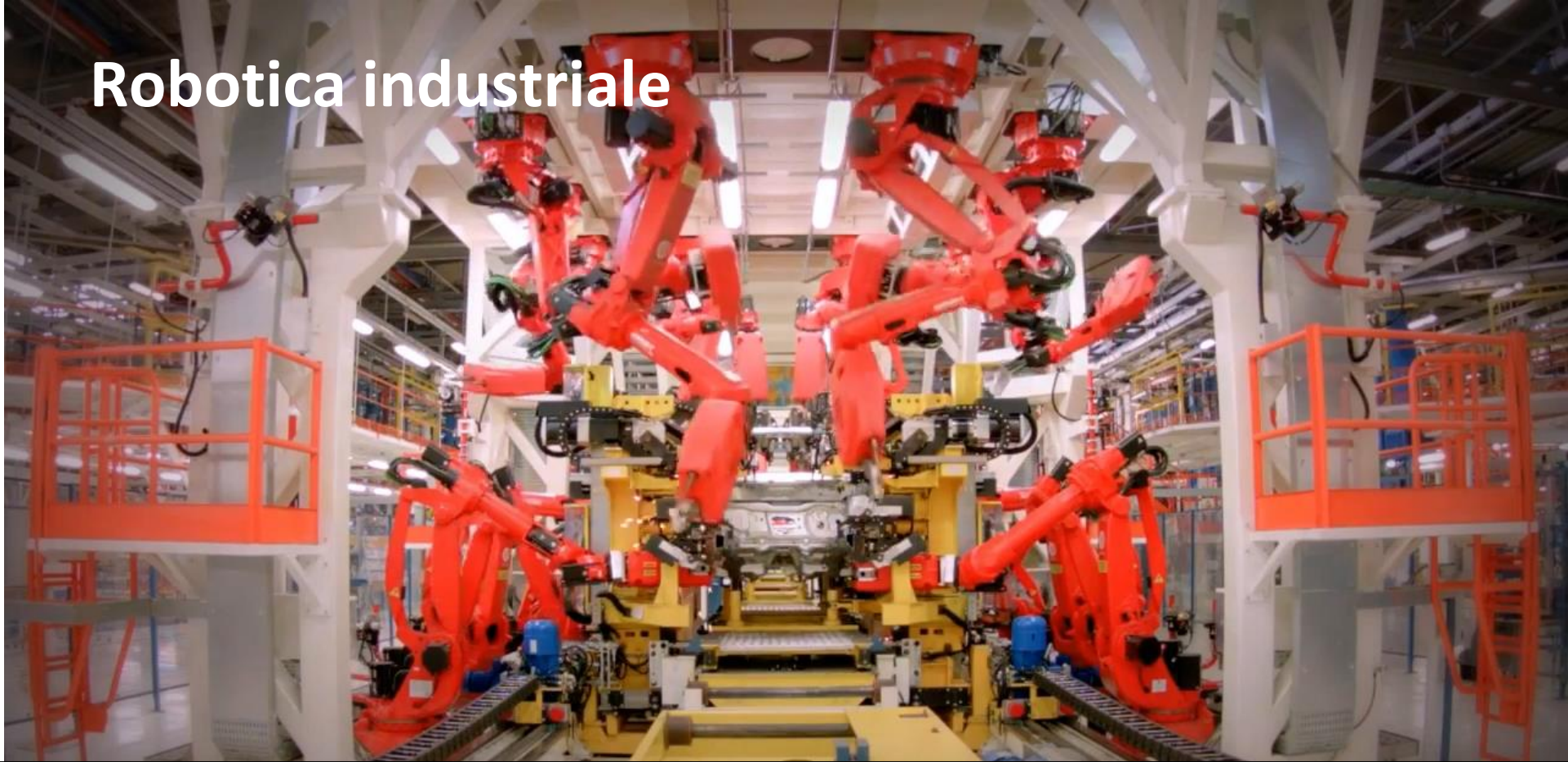
PUMA, il robot più usato nei laboratori di ricerca per sviluppare le teorie e le tecniche per il controllo di robot



Che cos'è un robot?



Robotica industriale



More than **1 million operational industrial robots in the world**, with a growth rate of 6% per year (Source: IFR)

Reliability: minimal requested values of industrial robots:

Mean Time Before Failure = 40,000 hrs, Efficiency $\eta > 99.99875\%$ (Source: COMAU)

Robotica industriale

The image shows a factory floor with several orange industrial robotic arms. They are positioned around a silver car chassis that is being assembled. The robots are working in a structured environment with metal frames and safety barriers. The scene is well-lit, and the overall atmosphere is one of a modern, automated manufacturing process.

Ambiente strutturato

Manipolatori ad elevate prestazioni in termini di accuratezza, ripetibilità, velocità, robustezza

Posizioni note degli oggetti da manipolare

Presenza umana ben delimitata

Operatori esperti (formati all'uso)

Robotica di servizio



Around 5 millions service robots are sold annually
Service robots are one of the fastest growing markets (~14%pa)
Professional service robots account for 80% of sales value



Robotica di servizio



Ambiente non strutturato

Condivisione dello spazio di lavoro tra persone e robot

Capacità percettive

Comportamento reattivo



Definizione di robot

Che cos'è un robot?



Definizione di robot

Un robot è un agente
fisico?



Definizione di robot

Un robot può
svolgere azioni?



Definizione di robot

Un robot può
sentire?



Definizione di robot

Un robot è
autonomo?



Definizione di robot

Un robot è
intelligente?



Definizione di robot

Un *robot* è un sistema autonomo,
che esiste nel mondo fisico,
può sentire l'ambiente in cui si trova
e può agire su di esso per
raggiungere degli obiettivi



Un robot è un sistema AUTONOMO

Autonomo

- Un robot *autonomo* agisce sulla base delle proprie decisioni e non è controllato da un essere umano

Non autonomo

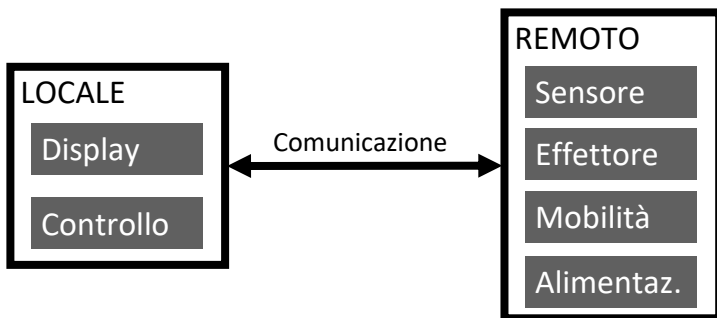
- Un robot non-autonomo viene comandato passo-passo da un operatore umano (tele-operazione)

Semi-autonomo

- Il controllo è condiviso tra il robot e la persona; possono esistere vari livelli di semi-autonomia



≠ da teleoperazione

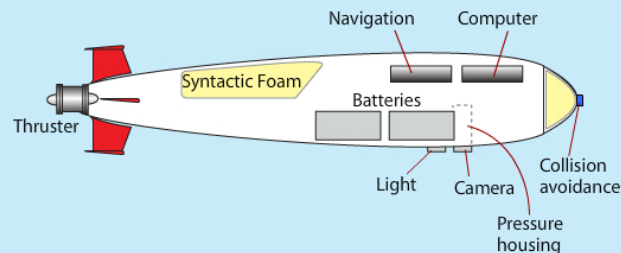


Robonaut

AUV Autonomous Underwater Vehicle

- Has:*
- Thrusters
 - Batteries
 - Navigation
 - Onboard computer
 - Pressure housing

- Does not have:*
- Tether
 - Manipulator arm
 - Sample basket
 - Personnel sphere



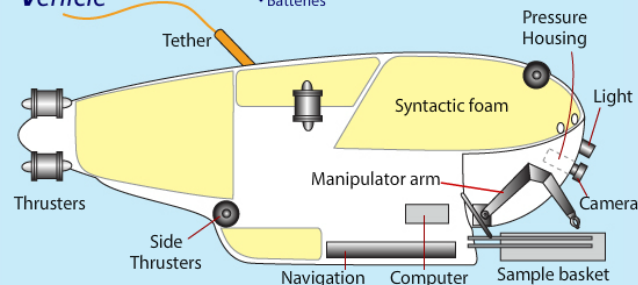
VS.

ROV Remotely Operated Vehicle

- Has:*
- Thrusters
 - Navigation
 - Sample basket

- Does not have:*
- Personnel sphere
 - Batteries

- Tether
- Manipulator arm
- Onboard computer
- Cameras

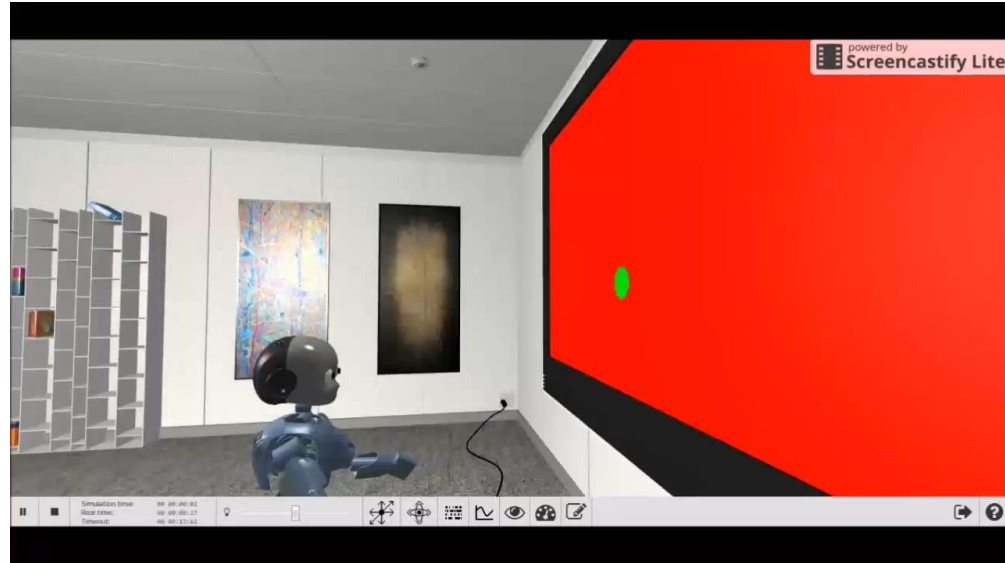


Un robot è un sistema autonomo che esiste nel MONDO FISICO

- Soggetto alle leggi della fisica

≠ dalle simulazioni

Il mondo fisico, le leggi della fisica e le interazioni sono simulate e in qualche modo approssimate



Un robot è un agente autonomo che esiste nel mondo fisico, può SENTIRE l'ambiente in cui si trova

- Il robot ha *sensori*, mezzi per sentire (es. udito, tatto, vista, olfatto, ecc.) in modo da ottenere informazioni sul mondo circostante.



Un robot è un agente autonomo che esiste nel mondo fisico, può sentire l'ambiente in cui si trova e può AGIRE su di esso

- Il robot ha *effettori* e *attuatori*, per eseguire azioni in risposta all'input sensoriale e per raggiungere l'obiettivo desiderato



Un robot è un agente autonomo che esiste nel mondo fisico, può sentire l'ambiente in cui si trova e può agire su di esso per raggiungere degli OBIETTIVI

- “Intelligenza” del robot



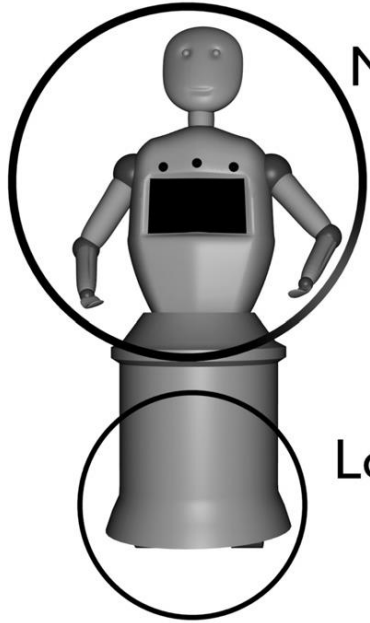
Cosa c'è in un robot?

Componenti di un robot



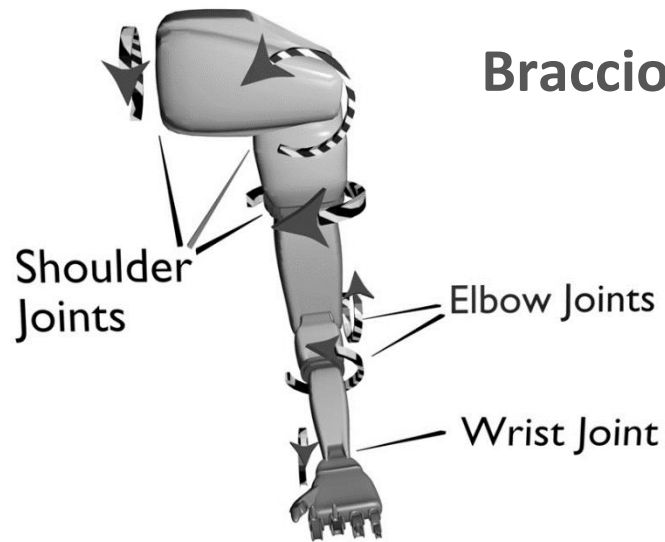
Effettori

Manipulation



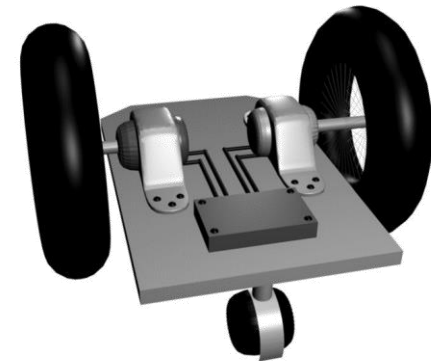
Locomotion

Braccio robotico



Catena di **link** rigidi, collegati da **giunti**, che ne permettono il movimento relativo

Ruote, tipicamente 2, per permettere sia l'avanzamento che la sterzata

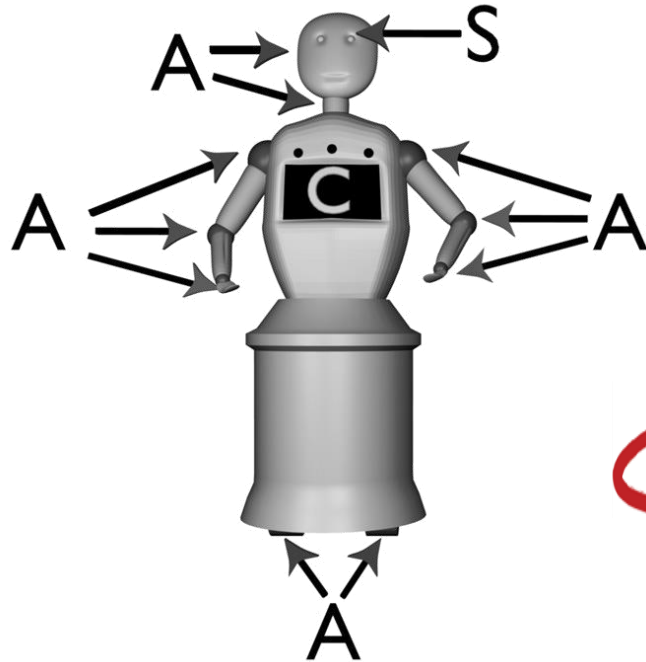


Robot mobile



Cosa c'è in un robot?

Componenti di un robot



Legenda

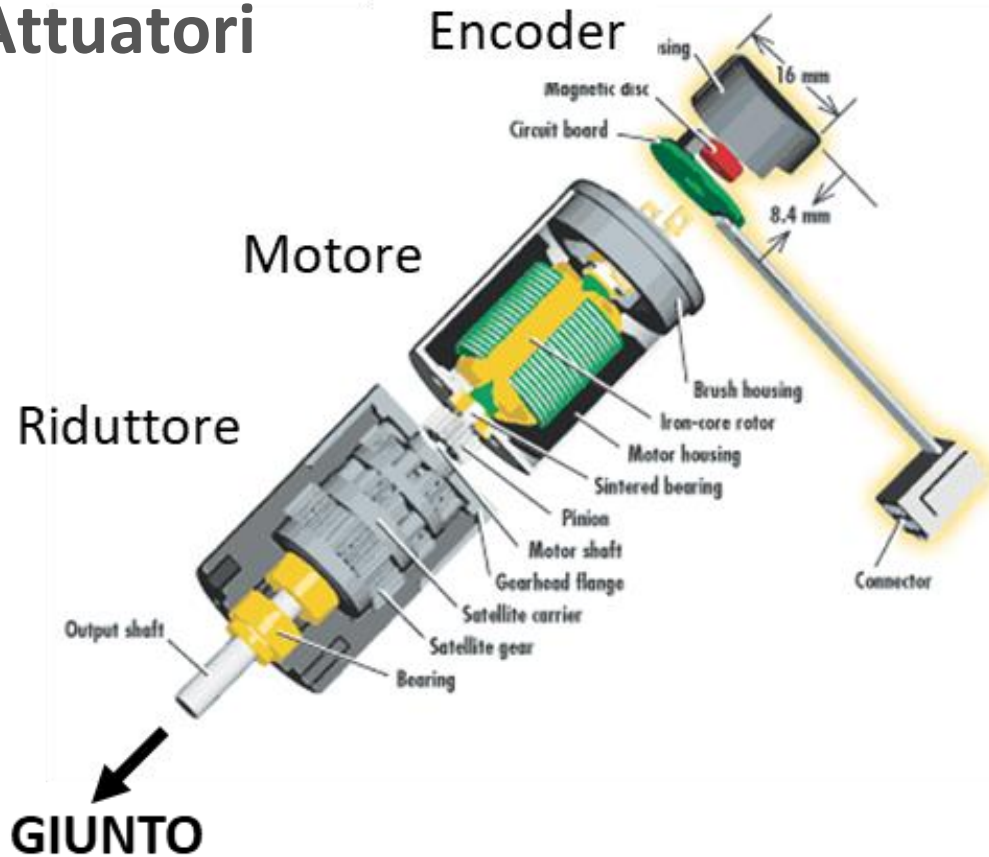
Attuatori

Controllore

Sensori



Attuatori



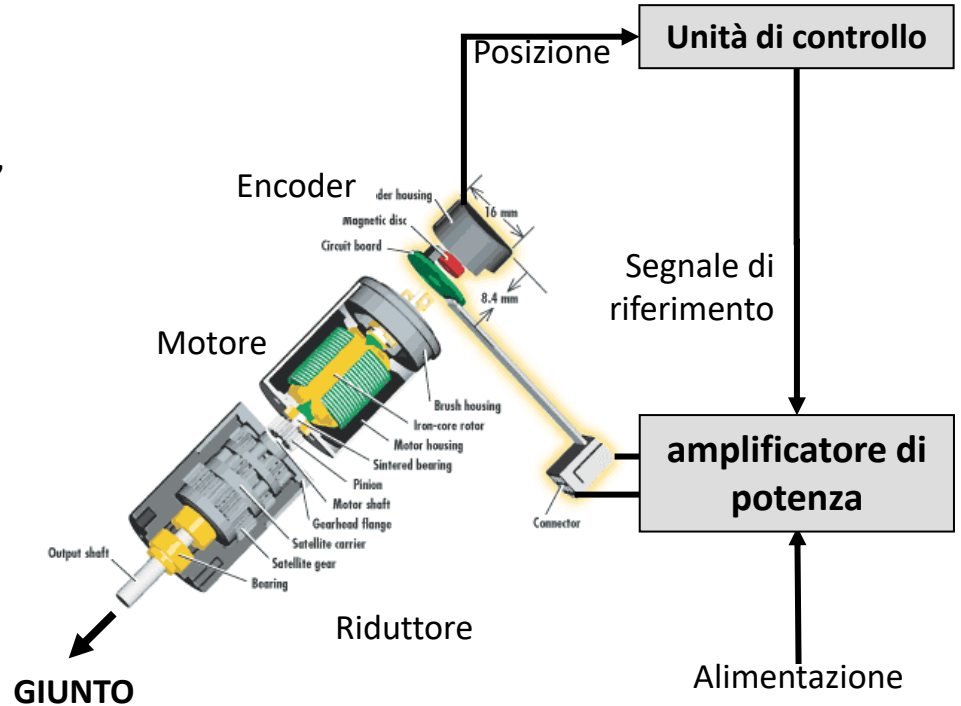
- Gli attuatori permettono al robot di **agire** sull'ambiente esterno, convertendo energia da una forma ad un'altra, in modo che questa agisca nell'ambiente.
- I motori, ad esempio, trasformano l'energia elettrica con cui sono alimentati in un'energia meccanica che determina il movimento del robot.



Sistema di controllo

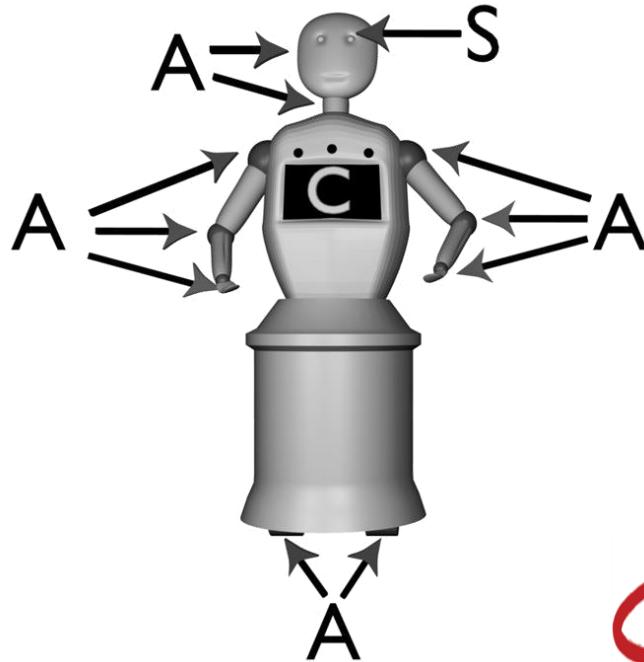
Un sistema di controllo fornisce un comando in tensione o in corrente agli attuatori (motori) in modo da far assumere una configurazione desiderata

- **Encoder:** sensore che misura la rotazione dei giunti in valore relativo o assoluto. La misurazione avviene in “*tacche di encoder*”
- **Riduttore:** meccanismo che riduce i giri dell’asse montato sul giunto rispetto ai giri del motore (es. riduzione 1:N)
- **Amplificatore di potenza:** amplifica un segnale di riferimento in un segnale di potenza per muovere il motore
- **Unità di controllo:** unità che produce un segnale di riferimento per il motore



Cosa c'è in un robot?

Componenti di un robot



Legenda

Attuatori

Controllore

Sensori



Sensore – definizione generale

I sensori sono dei dispositivi sensibili ad una determinata grandezza fisica ed in grado di trasformarla in un segnale misurabile (tipicamente elettrico).

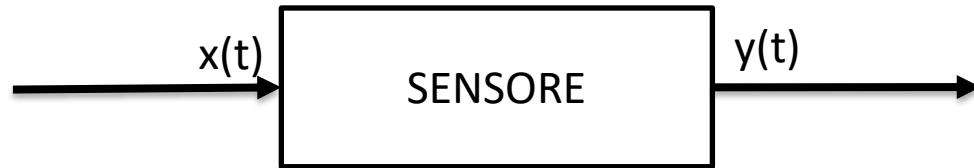


Quali sensori usiamo nella vita quotidiana?



Sensore – definizione generale

I sensori sono dei dispositivi sensibili ad una determinata grandezza fisica ed in grado di trasformarla in un segnale misurabile (tipicamente elettrico).



Il sensore è caratterizzato dalla sua **funzione di trasferimento**, ovvero dalla relazione che unisce il segnale d'ingresso $x(t)$ con il segnale d'uscita $y(t)$:

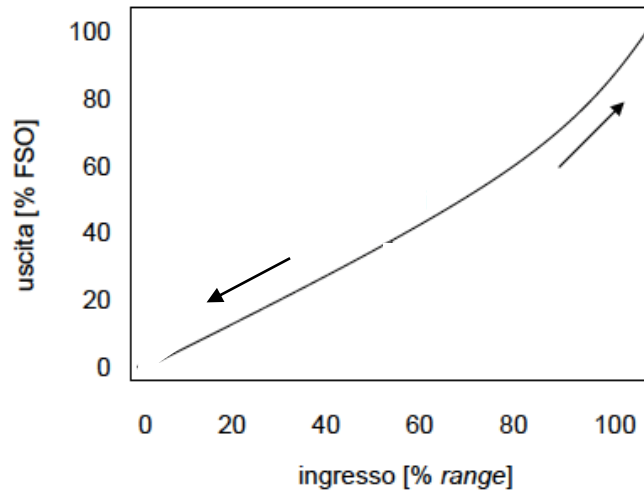
$$y(t) = f (x(t))$$



Procedura di calibrazione di un sensore

L'operazione di calibrazione (o taratura) di un sensore consiste nella lettura della grandezza di uscita per valori noti della grandezza in ingresso al sensore stesso.

Sono forniti in ingresso prima valori crescenti e poi decrescenti.



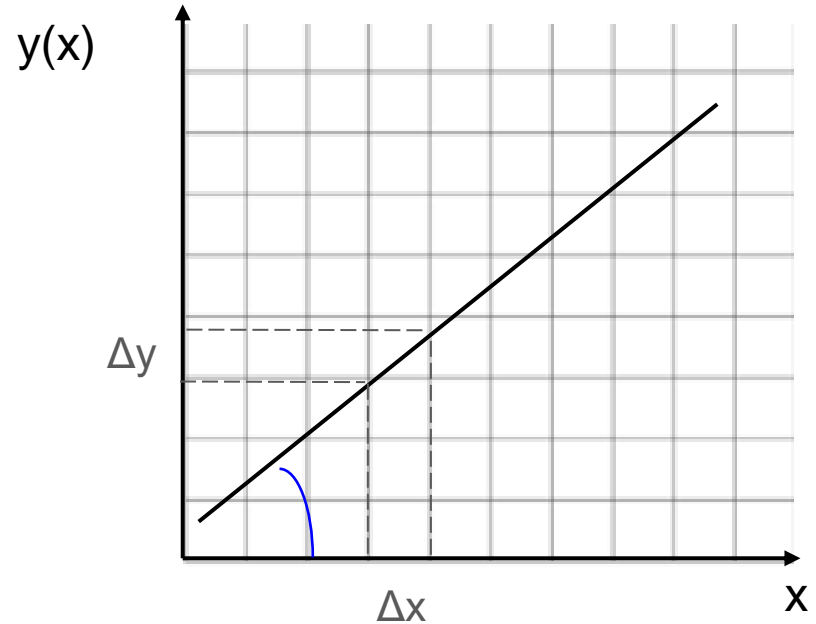
$$y(t) = f(x(t))$$



Parametri fondamentali di un sensore

1. Sensibilità

Rapporto tra la variazione del segnale in uscita e la corrispondente variazione della grandezza in ingresso.

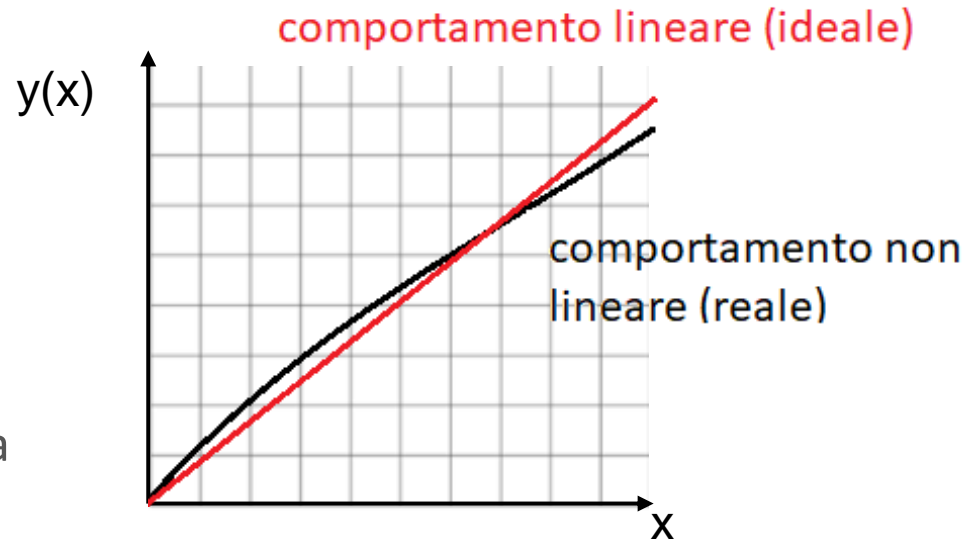


Parametri fondamentali di un sensore

2. Linearità

E' un'indicazione di quanto la funzione di trasferimento si discosta dall'andamento rettilineo.

E' specificata fornendo il valore massimo dello scostamento dei singoli punti della curva di taratura da una retta di riferimento opportunamente definita

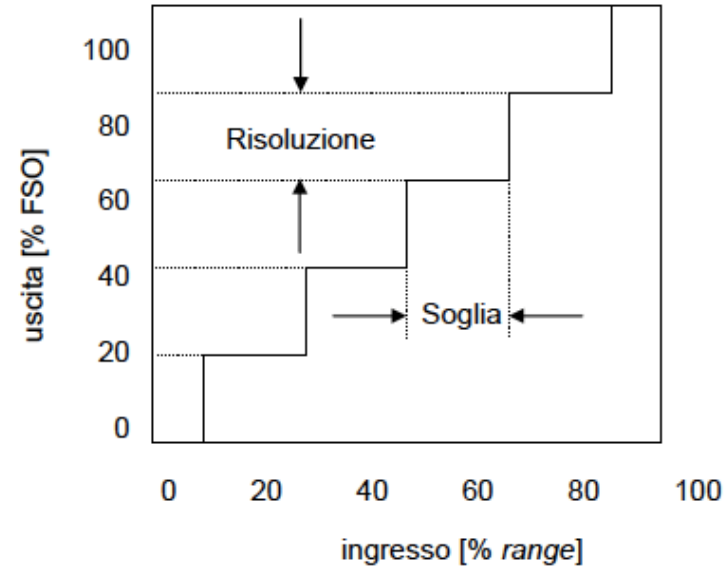
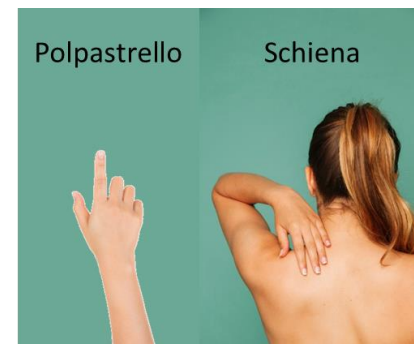


Parametri fondamentali di un sensore

3. Risoluzione

Rappresenta l'ampiezza del passo delle uscite (distanza fra due uscite consecutive) al variare dell'ingresso in tutto il suo range.

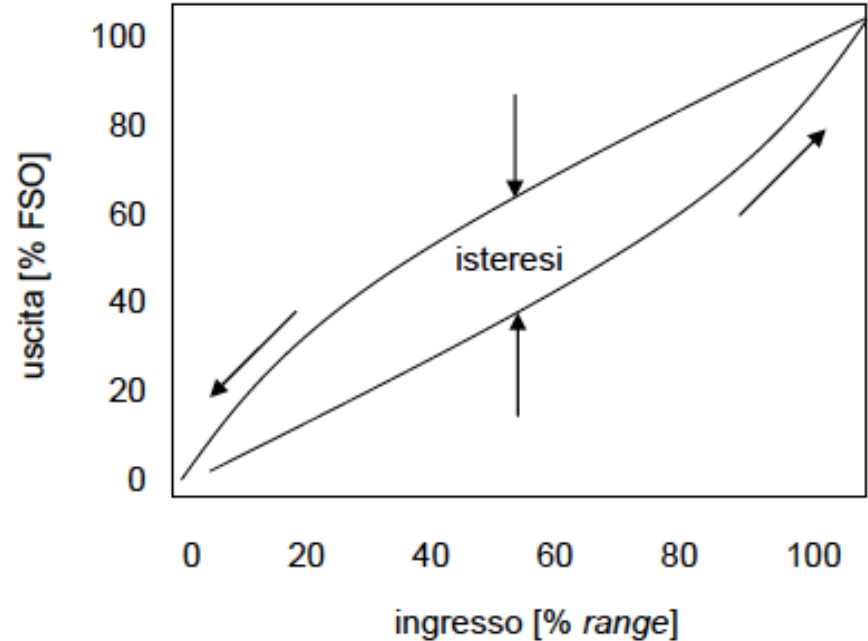
Si può definire anche come la minima variazione di input che da luogo ad una variazione apprezzabile di output.



Parametri fondamentali di un sensore

4. Isteresi

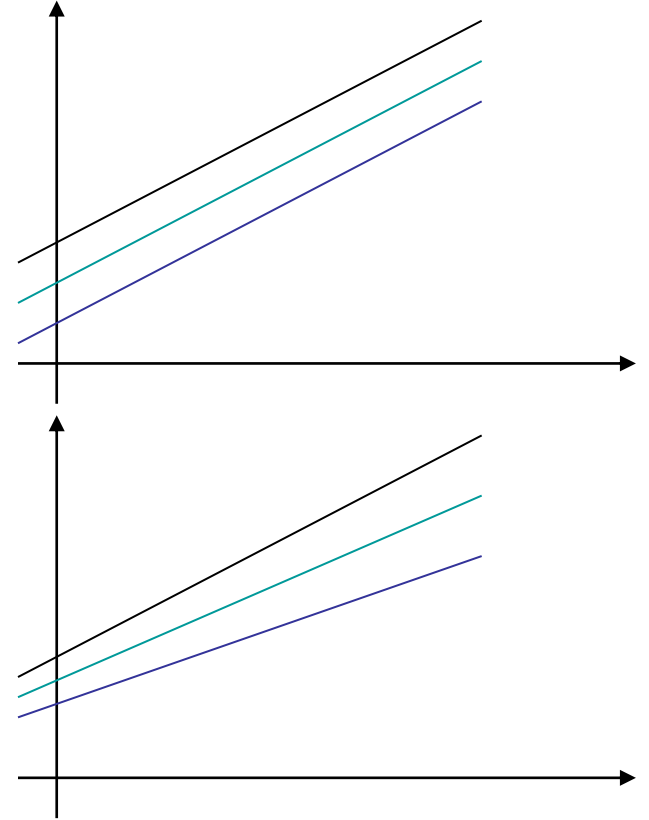
Rappresenta la massima differenza tra i valori di uscita corrispondente ad uno stesso ingresso, ottenuto prima per valori crescenti e poi decrescenti



Parametri fondamentali di un sensore

5. Drift

È definito come la variazione del segnale di uscita del sensore su lunghi periodi di tempo quando all'ingresso viene applicato un segnale costante.



Parametri fondamentali di un sensore

6. Accuratezza

L'accuratezza di un sensore è il massimo scostamento tra la misura (o “lettura”) fornita dal sensore e il “valore vero” del misurando.

$$\text{Accuratezza in \% del fondo scala} \quad \epsilon_f = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_{FS}}$$

- X_v = valore vero del misurando
- X_m = valore misurato (nel caso peggiore)
- X_{FS} = valore di fondo scala

$$\text{Accuratezza in \% della misura} \quad \epsilon_a = 100 \cdot \frac{X_m - X_v}{X_v}$$

$$\text{Accuratezza assoluta} \quad \epsilon(X_v) = |X_m - X_v|$$



Parametri fondamentali di un sensore

7. Ripetibilità

La precisione o ripetibilità di un sensore esprime la riproducibilità di una misura, ossia esprime l'attitudine del sensore a fornire valori della grandezza in uscita poco diversi tra loro, a parità di segnale in ingresso (= stesso valore vero) e nelle stesse condizioni di lavoro.



Parametri fondamentali di un sensore

Accuratezza e ripetibilità

A



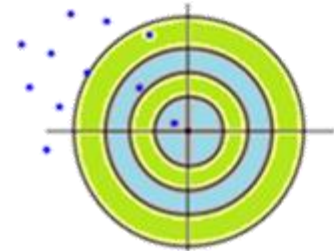
Misura ripetibile e accurata

B



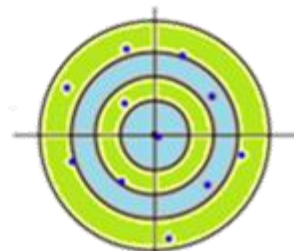
Misura ripetibile e non accurata

C



Misura non ripetibile e non accurata

D



Misura non ripetibile e accurata



Sensori

- esterocezione

Misura di variabili che caratterizzano l'ambiente esterno

- Es:

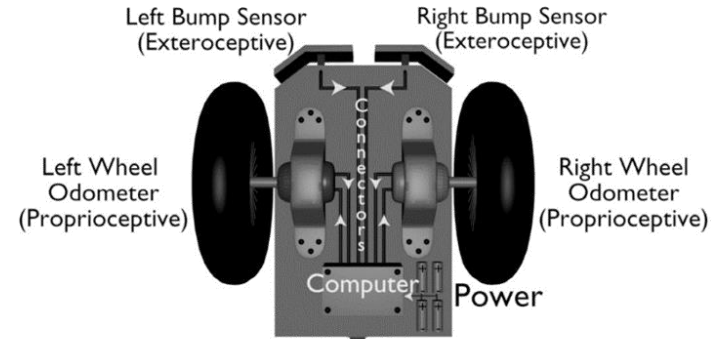
Physical Property	→	Sensing Technology
Contact	→	bump, switch
Distance	→	ultrasound, radar, infra red
Light level	→	photocells, cameras
Sound level	→	microphones
Strain	→	strain gauges
Rotation	→	encoders and potentiometers
Acceleration	→	accelerometers and gyroscopes
Magnetism	→	compasses
Smell	→	chemical sensors
Temperature	→	thermal, infra red
Inclination	→	inclinometers, gyroscopes
Pressure	→	pressure gauges
Altitude	→	altimeters

- propriocezione

Misura di variabili interne al sistema, che vengono usate per controllare il robot

- Es:

- Posizione dei giunti
- Livello della batteria

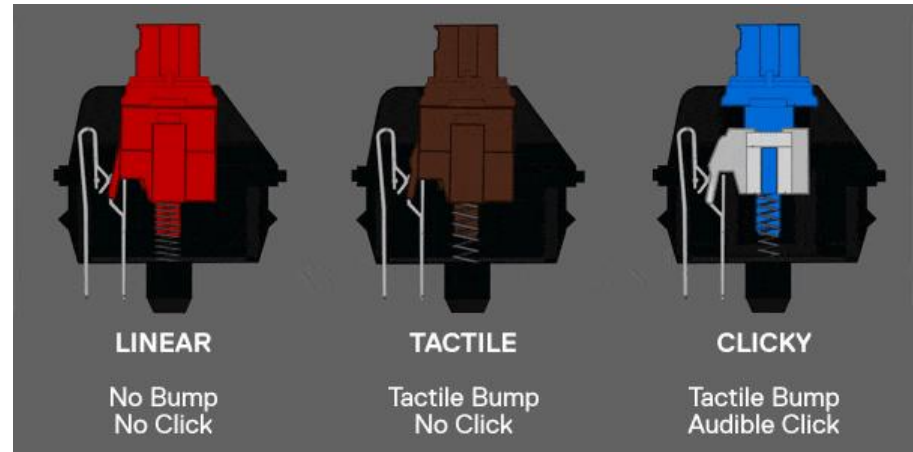
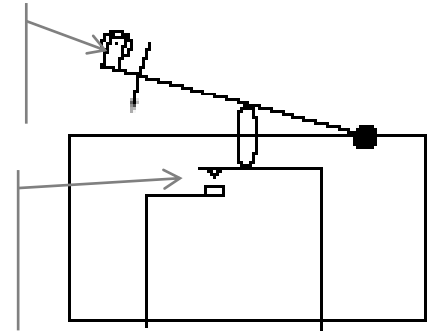


Interruttori meccanici

- I più semplici sensori di contatto
- Forniscono un'uscita binaria:
contatto / non contatto
- Applicazioni in robotica:
 - Paraurti su robot mobili
 - Sensori di fine corsa sui giunti

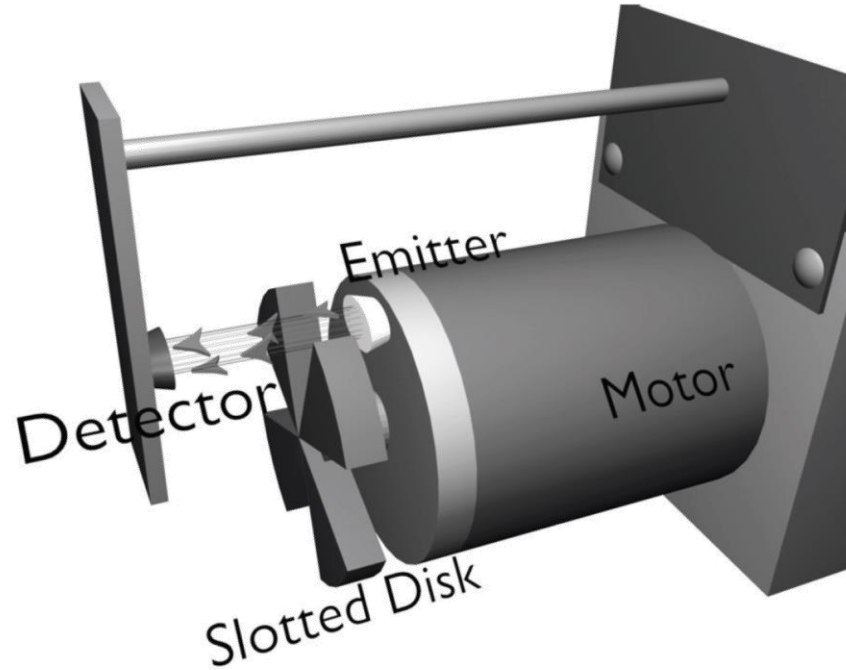
LEVA CHE VIENE
PREMUTA IN CASO
DI CONTATTO

IL CONTATTO CHIUDE
MECCANICAMENTE UN
CIRCUITO ELETTRICO



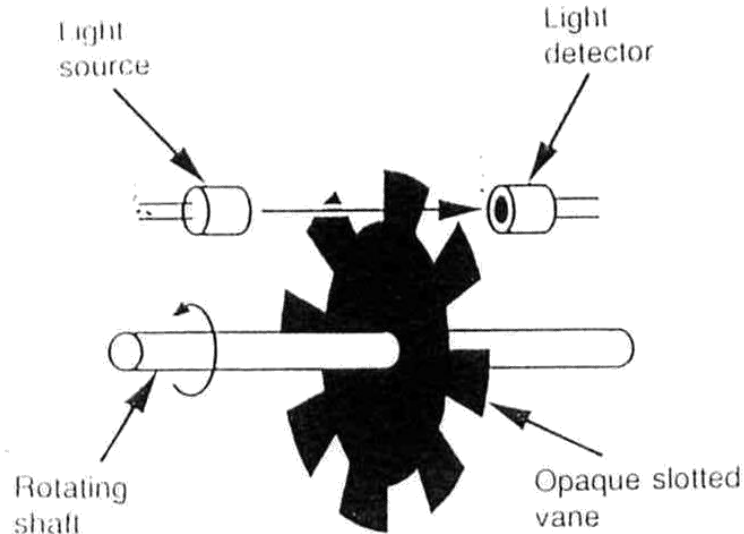
Encoder ottici

- Misura della rotazione angolare di un asse



Encoder ottici

La **rotazione** viene misurata contando gli **impulsi**, conoscendo il numero delle **tacche**



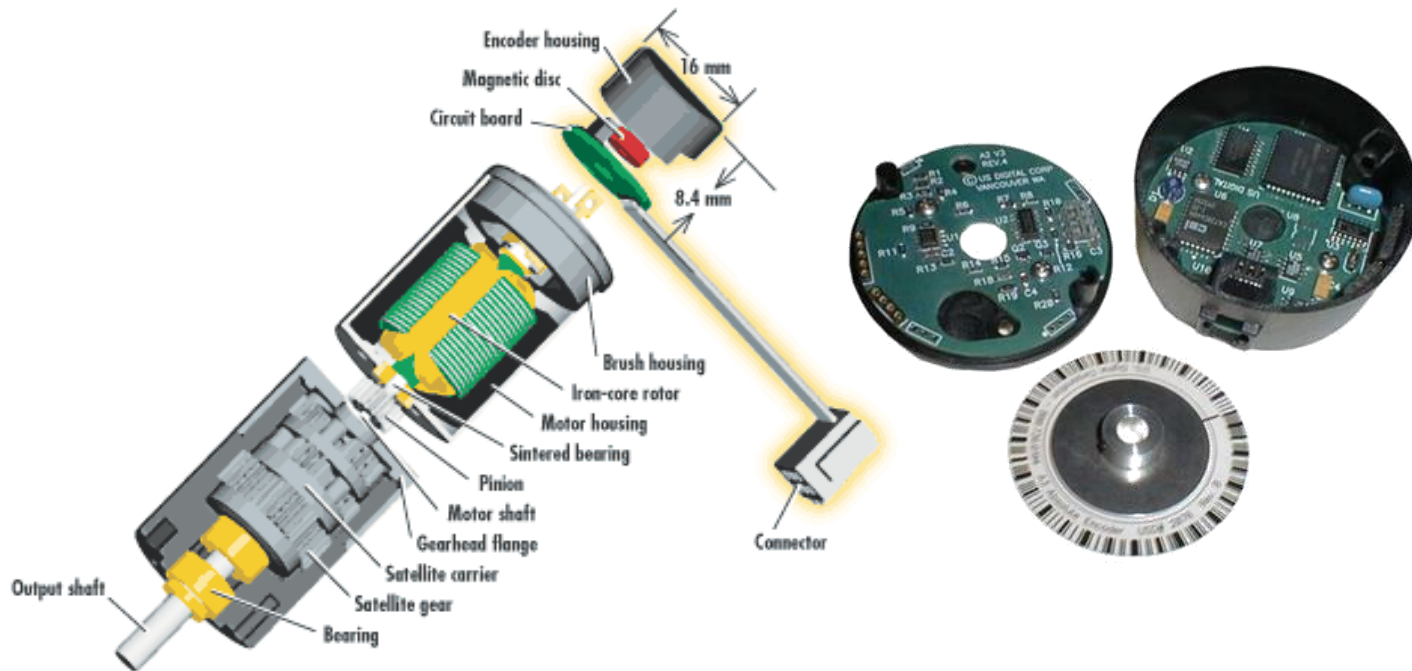
$$q = \frac{\theta \times 360^\circ}{R \times k}$$

- q: posizione angolare del giunto (in gradi)
- θ : posizione del giunto in tacche di encoder
- k: rapporto di riduzione del motore
- R: risoluzione dell'encoder
(numero di tacche per giro)

La **frequenza** del treno di impulsi è proporzionale **velocità angolare**



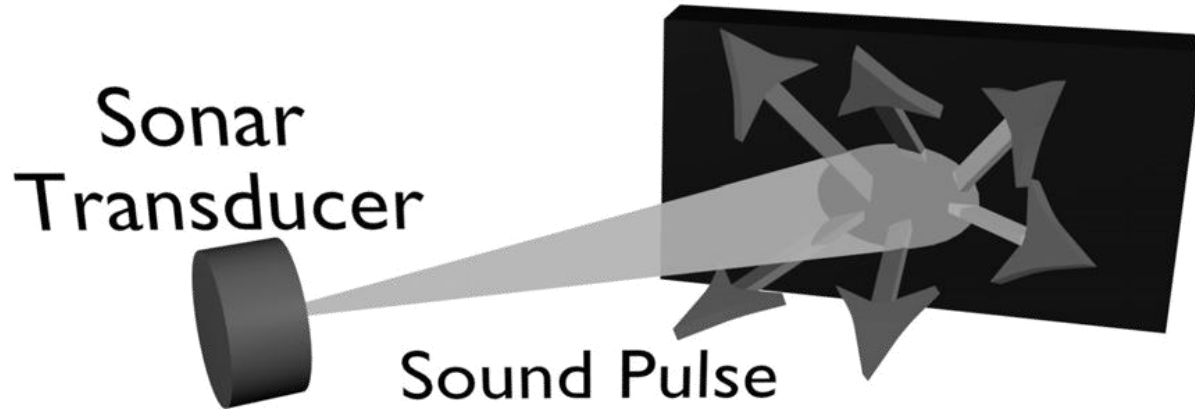
Encoder ottici in un motore elettrico



Sensori a ultrasuoni

Misura della **distanza** (o range*)

Basata sul **tempo di volo**



*r = range è la distanza tra il sensore e l'oggetto

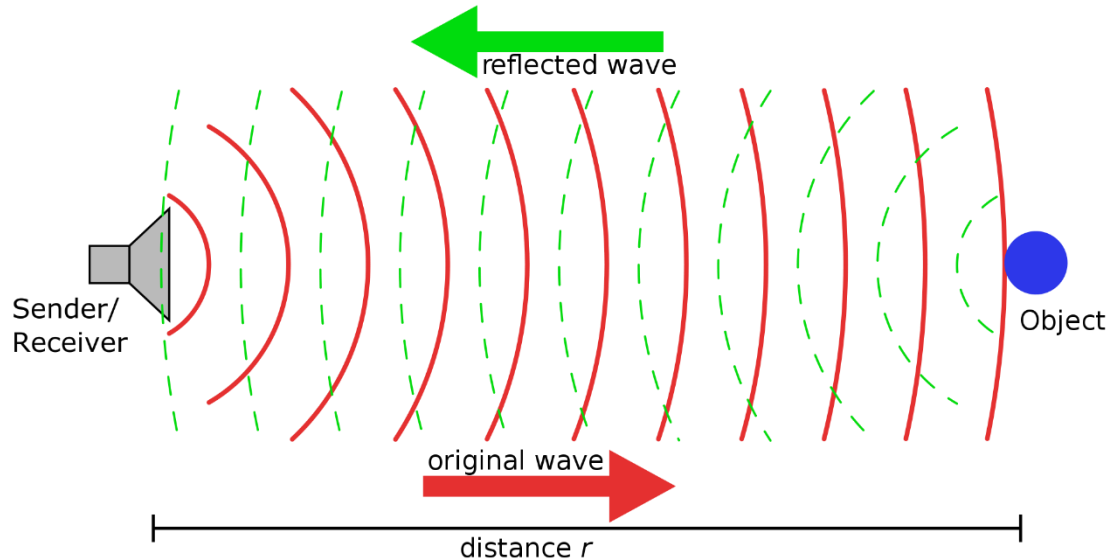


Misura della distanza basata sul tempo di volo

$$r = \frac{t_e v}{2}$$

v : velocità media del segnale emesso

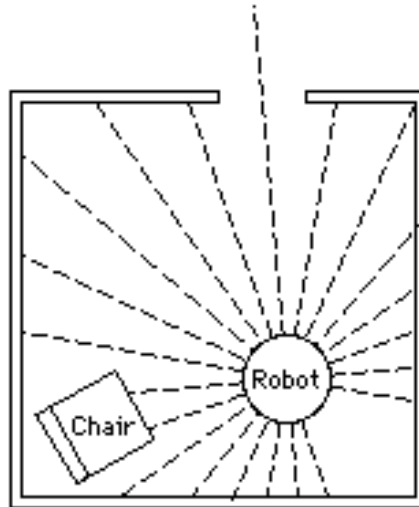
t_e : tempo tra l'emissione del segnale e la sua ricezione.



*r = range è la distanza tra il sensore e l'oggetto

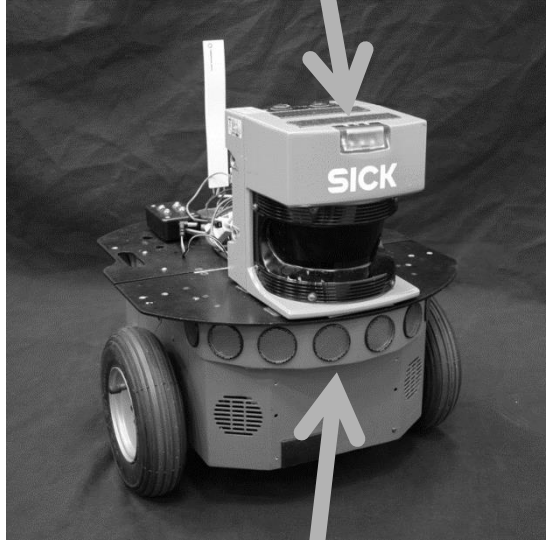


Esempio di applicazione di sensori a ultrasuoni su un robot mobile

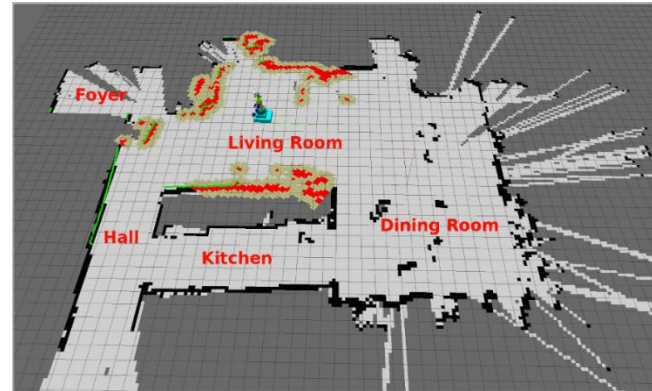
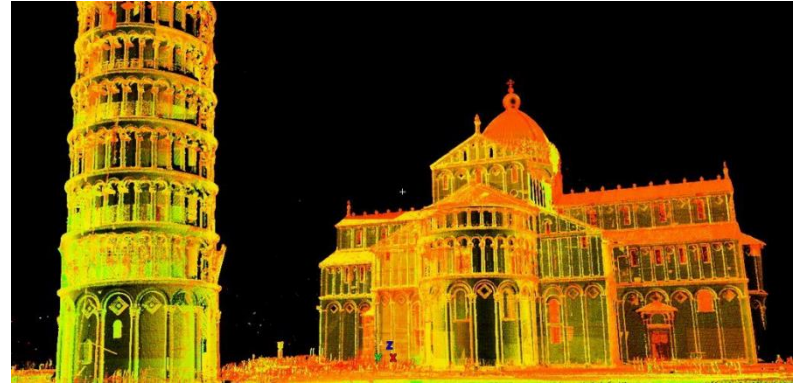


Sensori laser

Laser scanner



Sensori a ultrasuoni

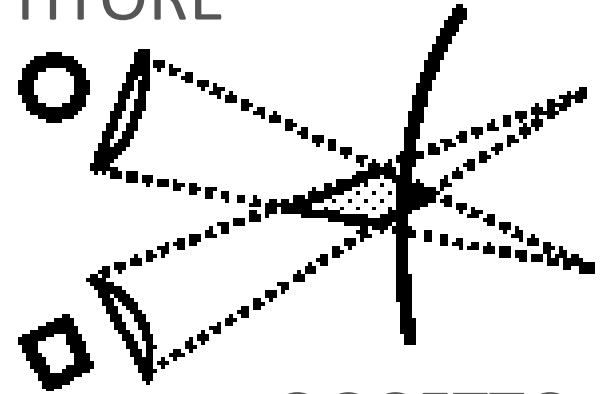


Sensori di prossimità

- Rilevano la presenza di un oggetto in un intorno spaziale
- Es. Sensori a infrarossi (IF)
 - emettono un segnale infrarosso e leggono la sua riflessione, data dalla presenza di un oggetto



EMETTITORE



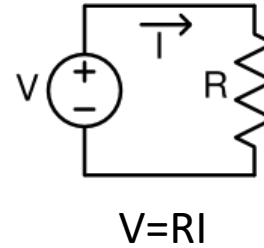
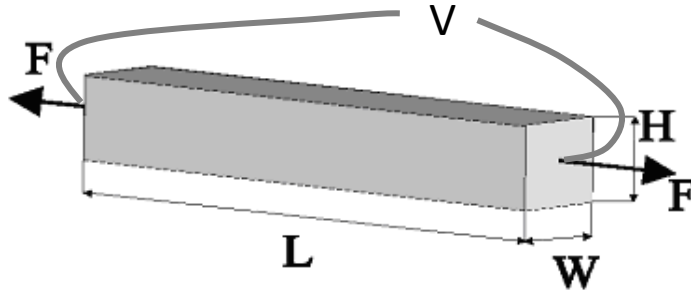
RILEVATORE

OGGETTO
RILEVATO



Effetto piezoresistivo

Tutti i materiali cambiano la propria resistenza elettrica con la **deformazione**



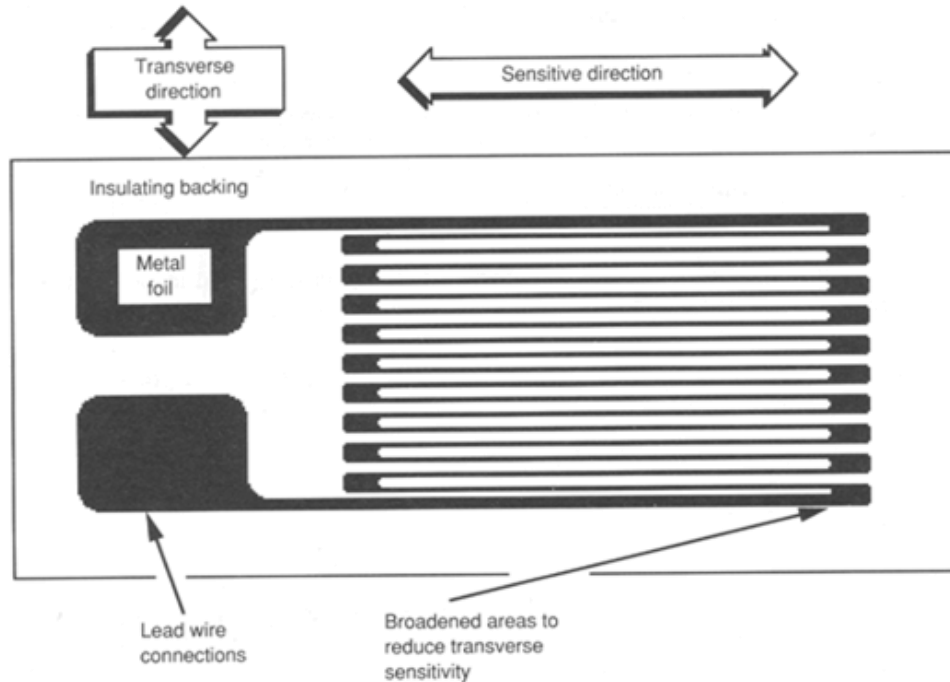
$$R = \rho \frac{L}{WH}$$

R: resistenza

ρ : resistività del materiale



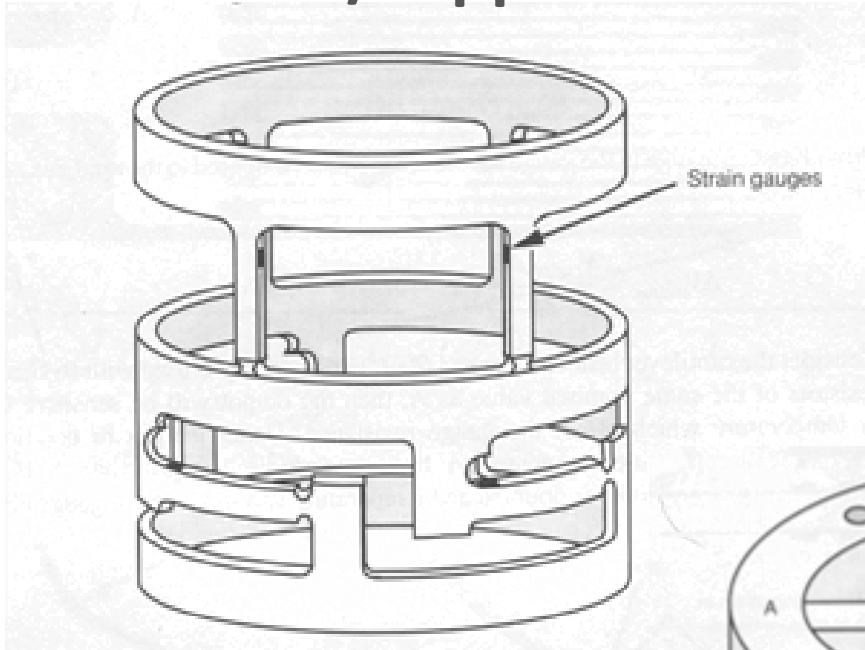
Strain gauge



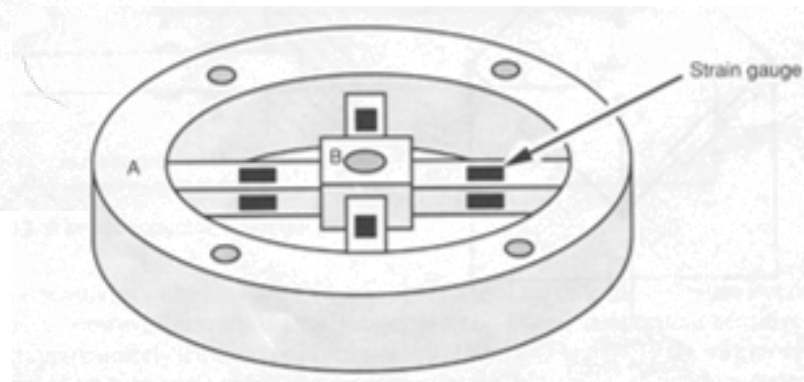
La forma del sensore amplifica la sensibilità in una direzione



Sensori di forza/coppia a 3 assi



- La struttura meccanica ha direzioni preferenziali di deformazione, lungo i 3 assi
- Strain gauges sono posizionati conseguentemente



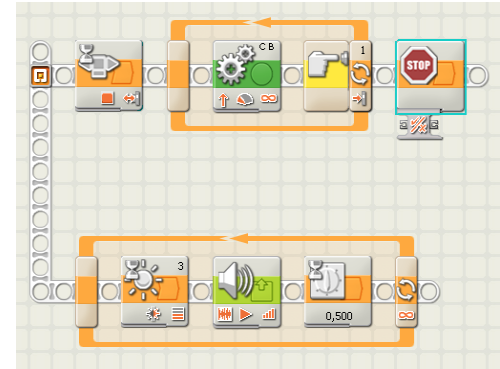
Lego Mindstorms

Morfologia
configurabile



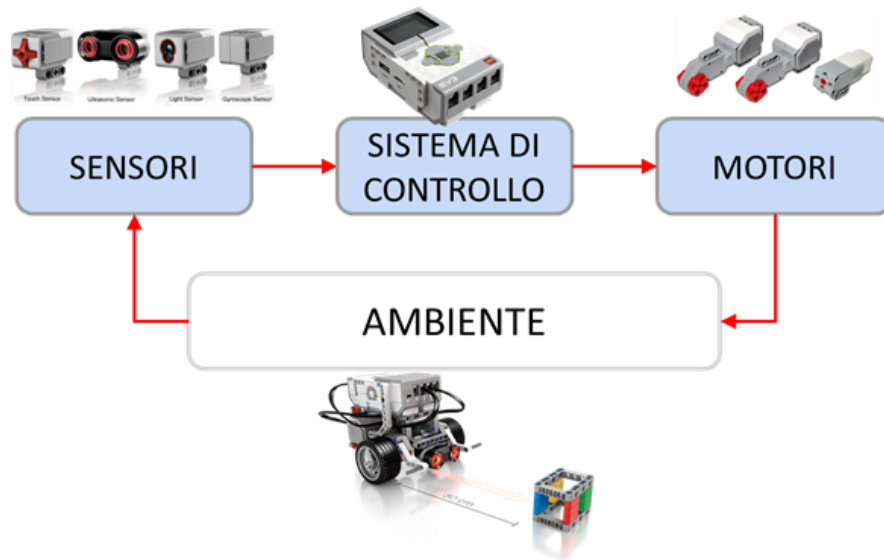
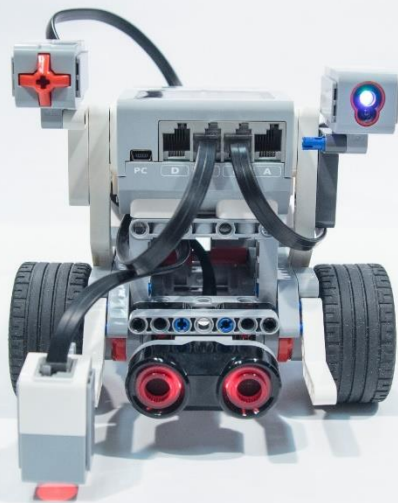
Motori

Sensori



Programmabile

LEGO MINDSTORMS
EV3



Sensore di colore

È un sensore digitale in grado di rilevare il colore o l'intensità della luce che entra nella piccola finestra situata nella parte anteriore del sensore.



LEGO MINDSTORMS

Il sensore può essere utilizzato in tre diverse modalità:

- Colore (7 colori)
- Intensità luce riflessa (scala 0-100)
- Intensità luce ambientale (scala 0-100)



Sensore a ultrasuoni

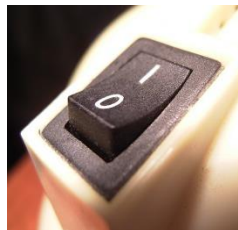
I sensori a ultrasuoni sono dei sensori in grado di rilevare la presenza di oggetti nelle immediate vicinanze, senza che vi sia un effettivo contatto.



LEGO MINDSTORMS EV3

Sensore di contatto

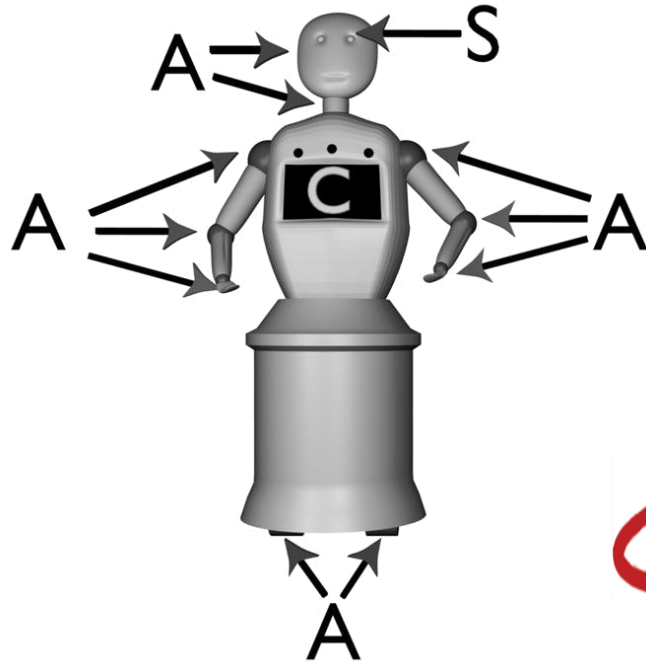
I sensori di contatto rilevano il contatto fisico con un oggetto; più precisamente, misurano una proprietà fisica (come la chiusura di un interruttore), che è solitamente causata da il contatto fisico con un oggetto.



LEGO MINDSTORMS EV3



Come funziona un robot?



Legenda

Attuatori

Controllore

Sensori



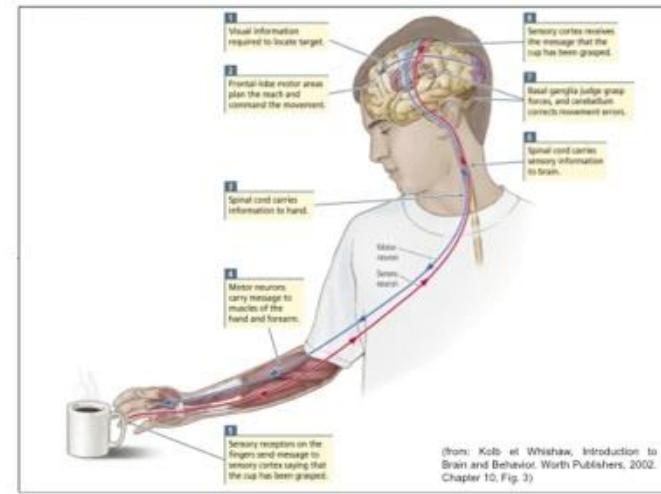
Comportamento di un robot

Funzioni primitive

PLAN

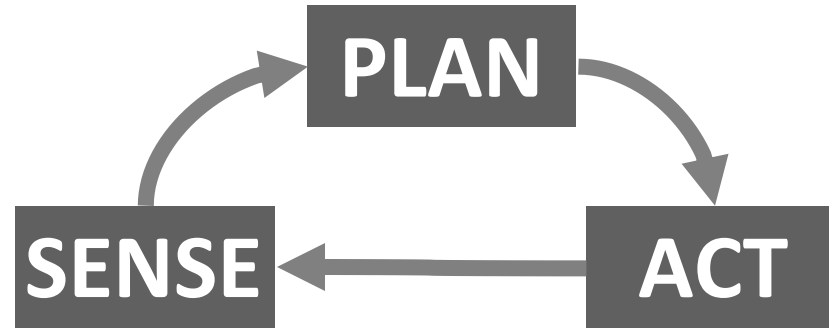
SENSE

ACT



Comportamento di un robot

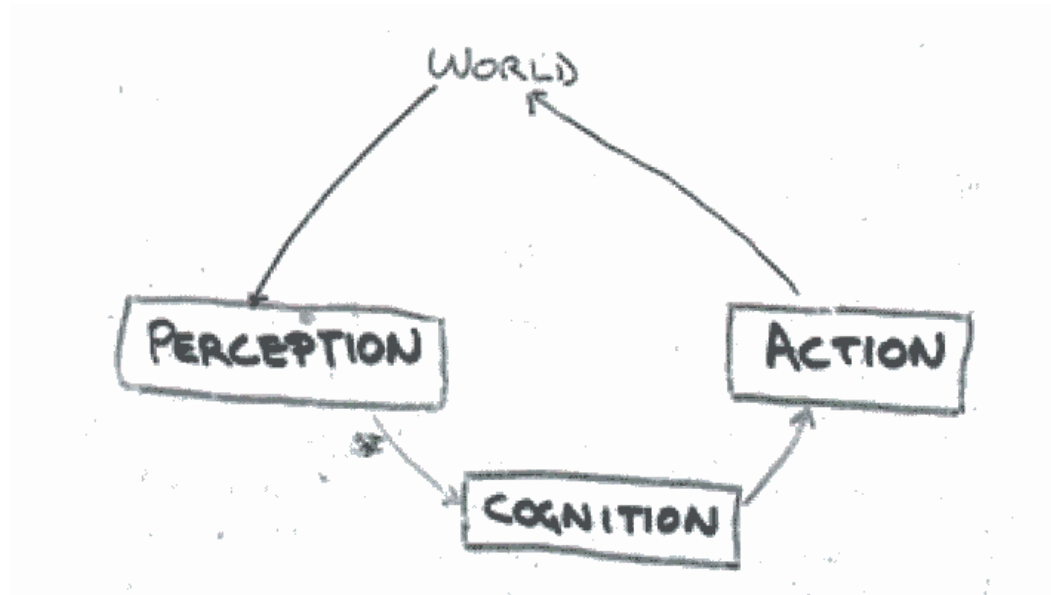
Funzioni primitive



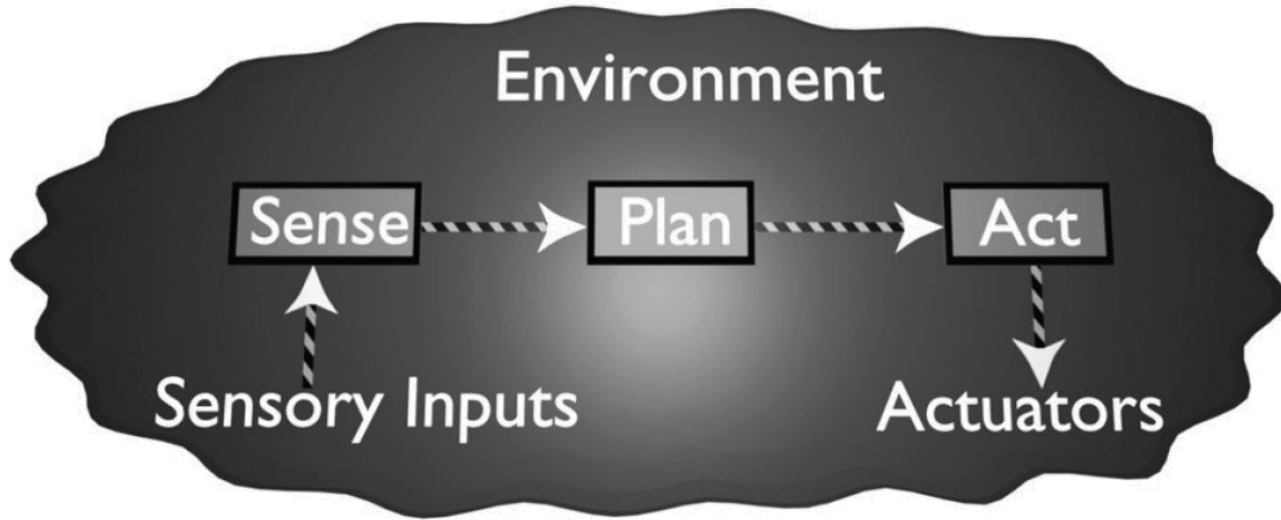
Architetture gerarchiche



Architetture Gerarchiche: Modello tradizionale per il comportamento di robot

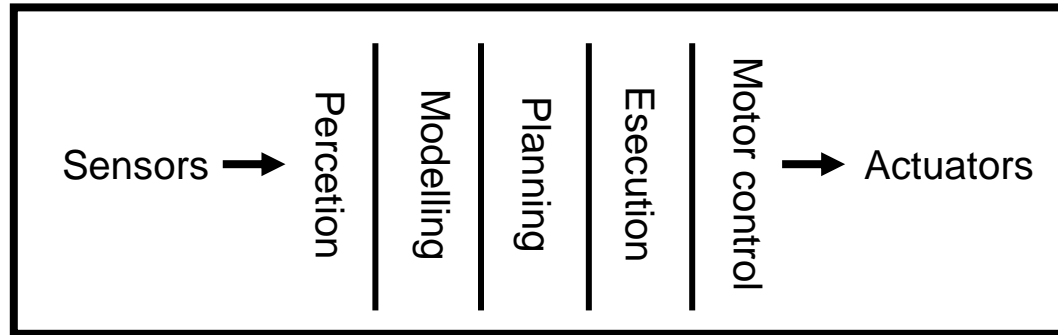


Architetture gerarchiche



Architetture gerarchiche

- Divisione e distribuzione dei compiti logica e funzionale
- Decomposizione orizzontale e sequenziale della catena di elaborazione dell'informazione



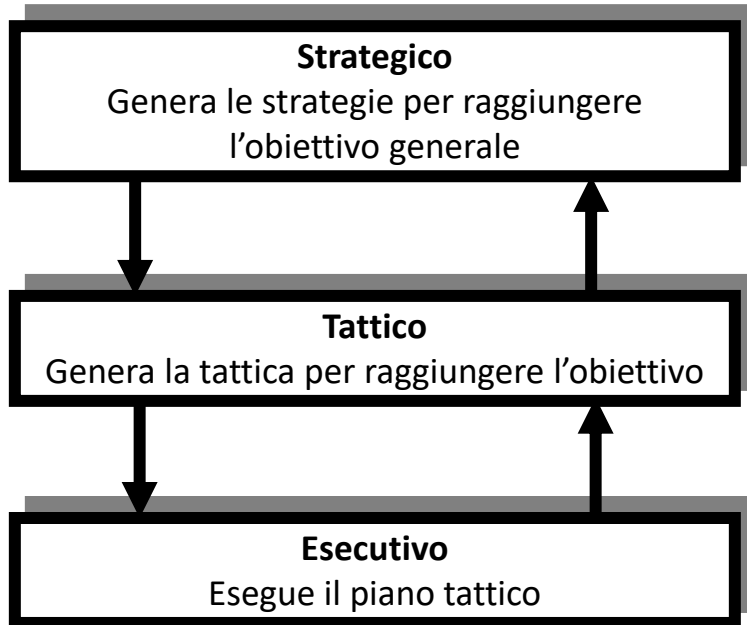
Architetture gerarchiche

- Generalmente la funzione primitiva PLAN è strutturata su 3 livelli:
 - Strategico
 - Tattico
 - Esecutivo
- Il livello più alto, o **strategico**, genera una strategia sulla base del compito da svolgere
- Il livello intermedio, o **tattico**, genera i comandi interpretando le istruzioni che arrivano dal livello più alto, strategico
- Il livello più basso, o **esecutivo**, riceve i comandi generati dal livello intermedio e si occupa di farli eseguire agli attuatori



Architetture gerarchiche

Struttura PLAN a 3 livelli



**Cosa il robot
deve fare**

Es. «prendi la bottiglia dal frigo»

«vai in cucina, vai davanti al frigo, apri il frigo, prendi la bottiglia, ...»

**Come svolgere il
compito**

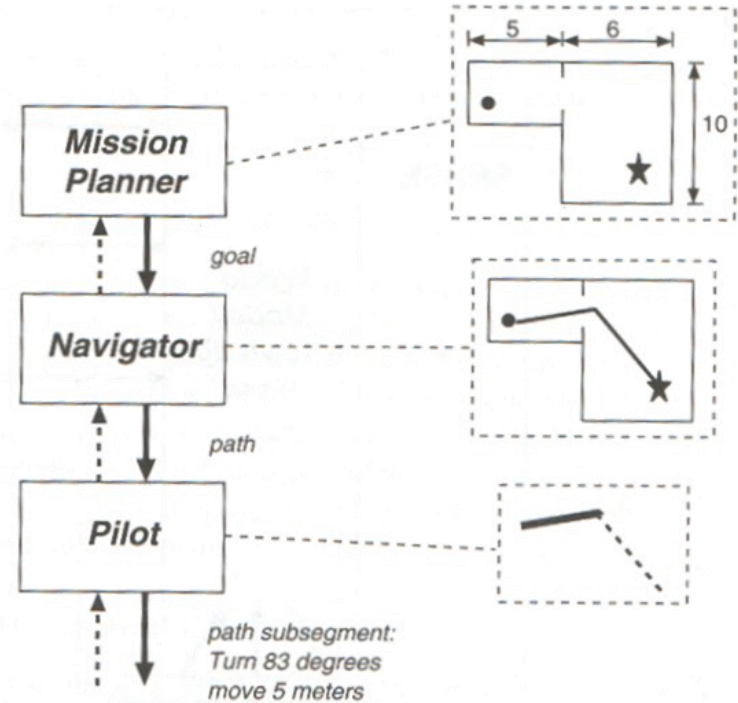
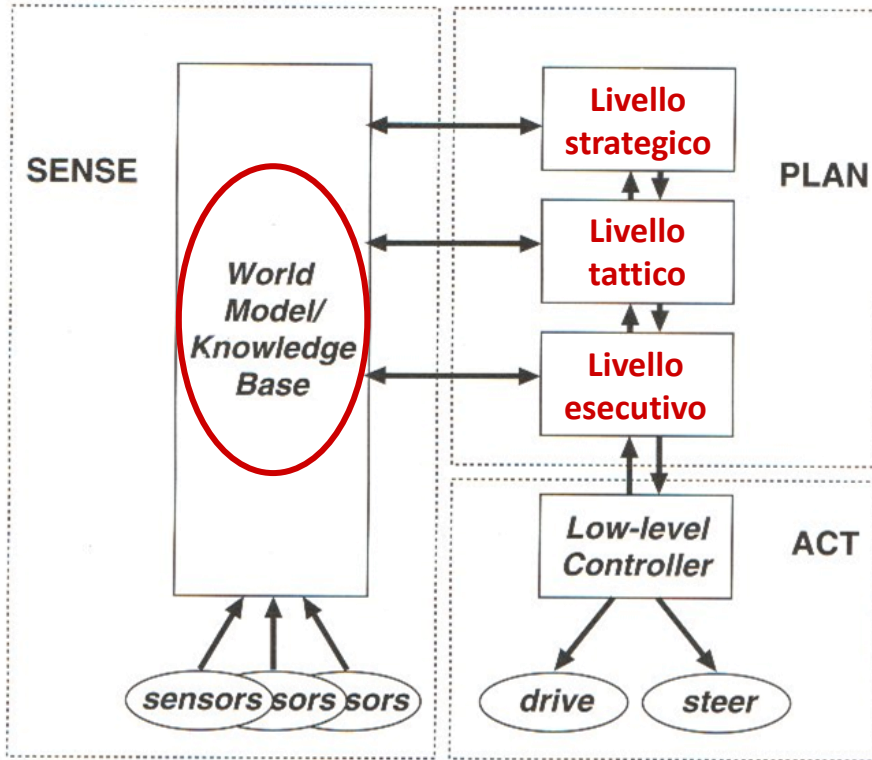
“vai in cucina” = raggiungi(X1,Y1);
raggiungi(X2,Y2); ...
“apri il frigo” = muovi_braccio(P1),
apri_mano; ...

**Esecuzione
dei comandi**

move_base(X1,Y1); move_base(X2,Y2);
move_braccio(P1); ...

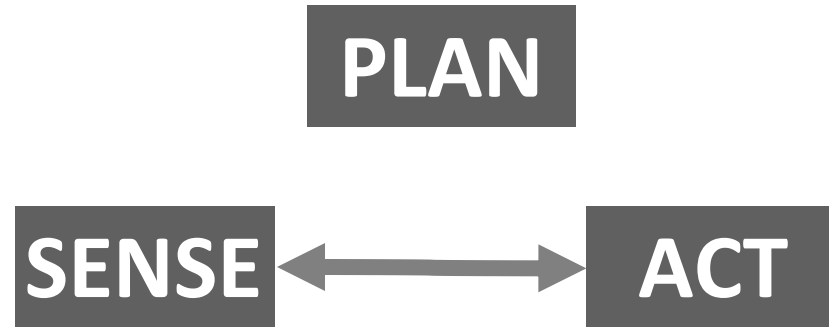


Nested Hierarchical Controller



Comportamento di un robot

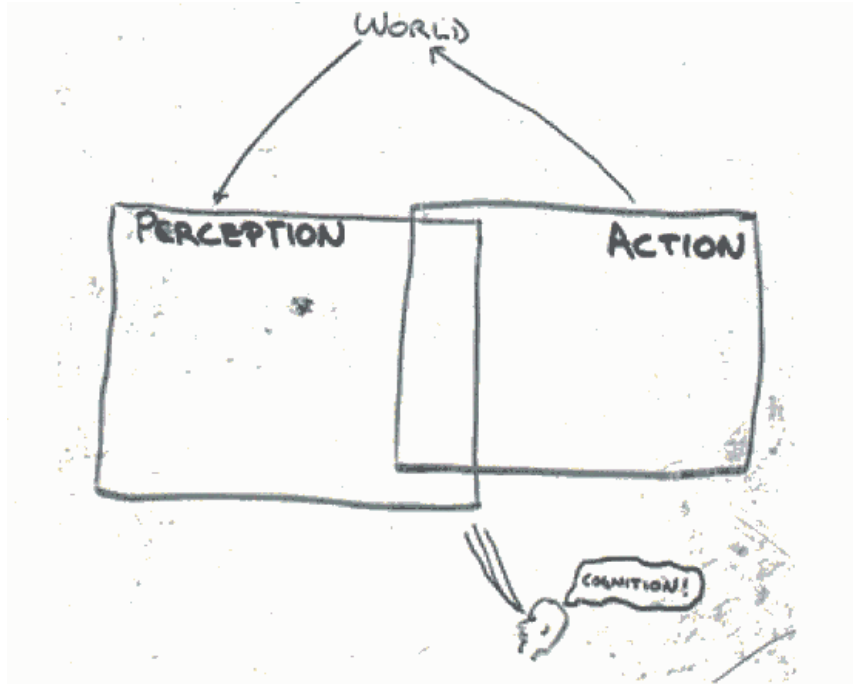
Funzioni primitive



Architetture reattive



Architetture Reattive o "basate sul comportamento"



Non esiste un modulo "Cognizione" vero e proprio e i sistemi di percezione e attuazione collaborano per definire i comportamenti del robot

Non esiste un modello del mondo. «Il mondo è il miglior modello di se stesso».

Rodney Brooks



Alcuni esempi tratti da...

Vehicles

Experiment in Synthetic Psychology

di Valentino Braitenberg

The MIT Press

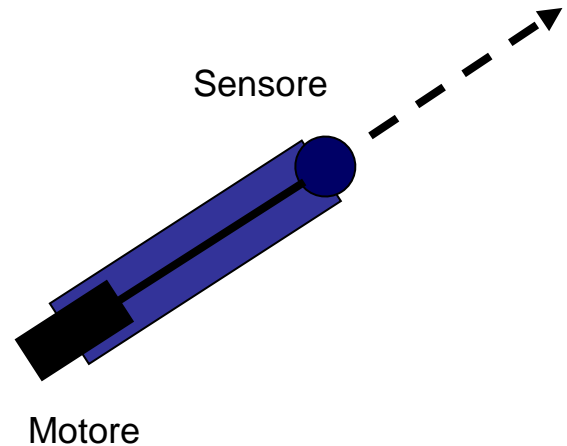


Direttore del Max Planck Institute for Biological Cybernetics, 1968-1994



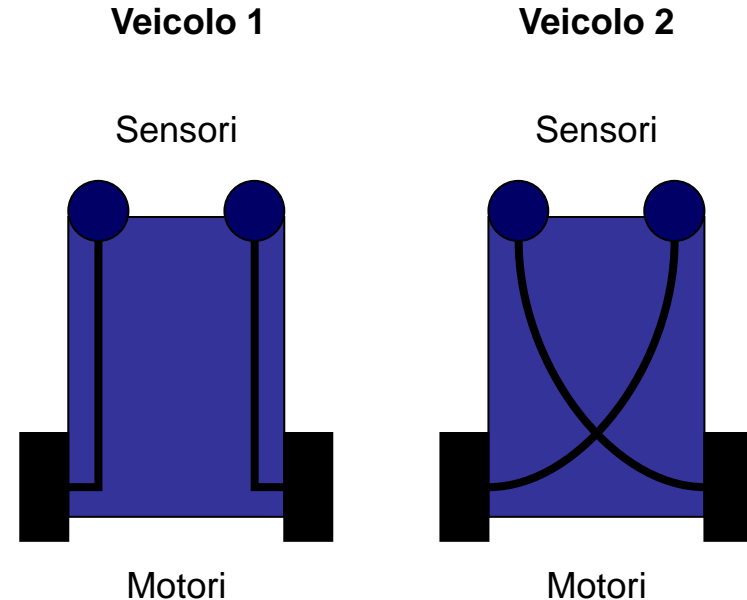
Esperimento 1

- Il primo veicolo è equipaggiato con un motore ed un sensore di temperatura: il motore è collegato direttamente al sensore
- Il collegamento è tale che la velocità del motore è proporzionale alla temperatura misurata dal sensore
- Il veicolo si muove sempre lungo la stessa direzione, più velocemente nelle zone calde e più lentamente nelle zone fredde

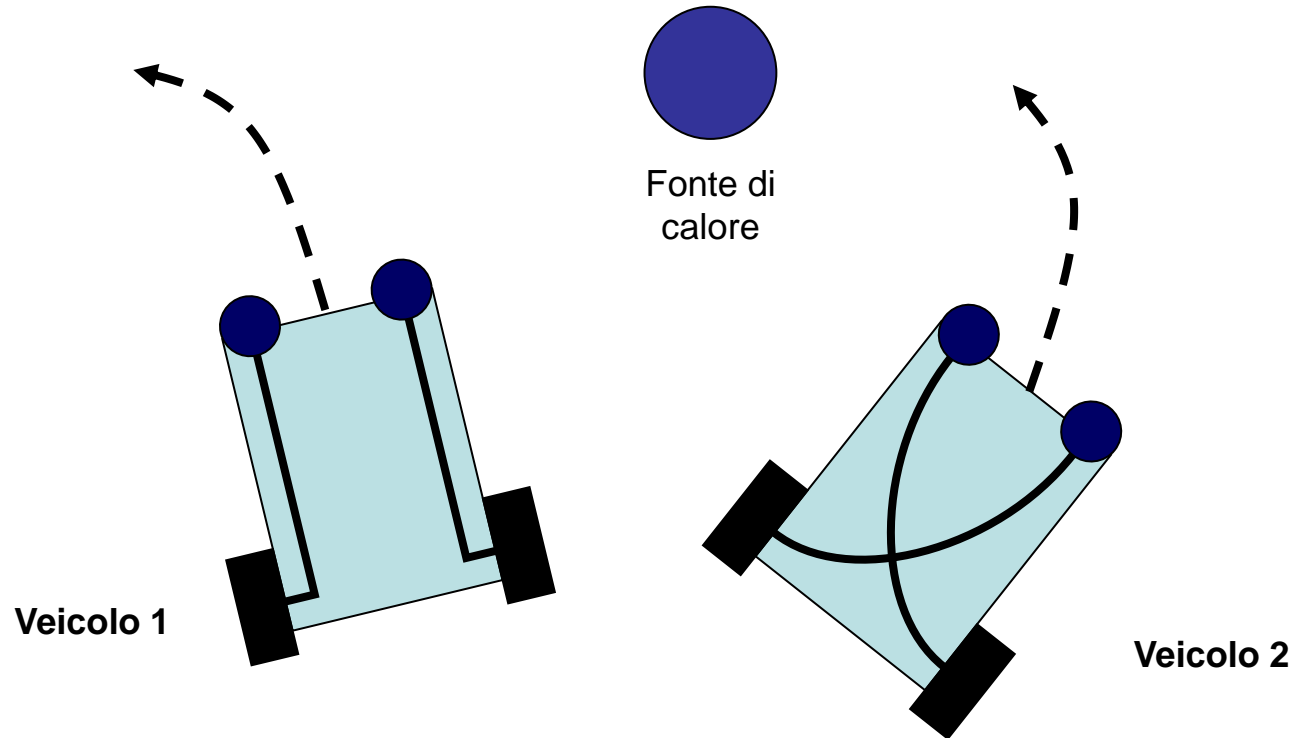


Esperimento 2: paura e aggressione

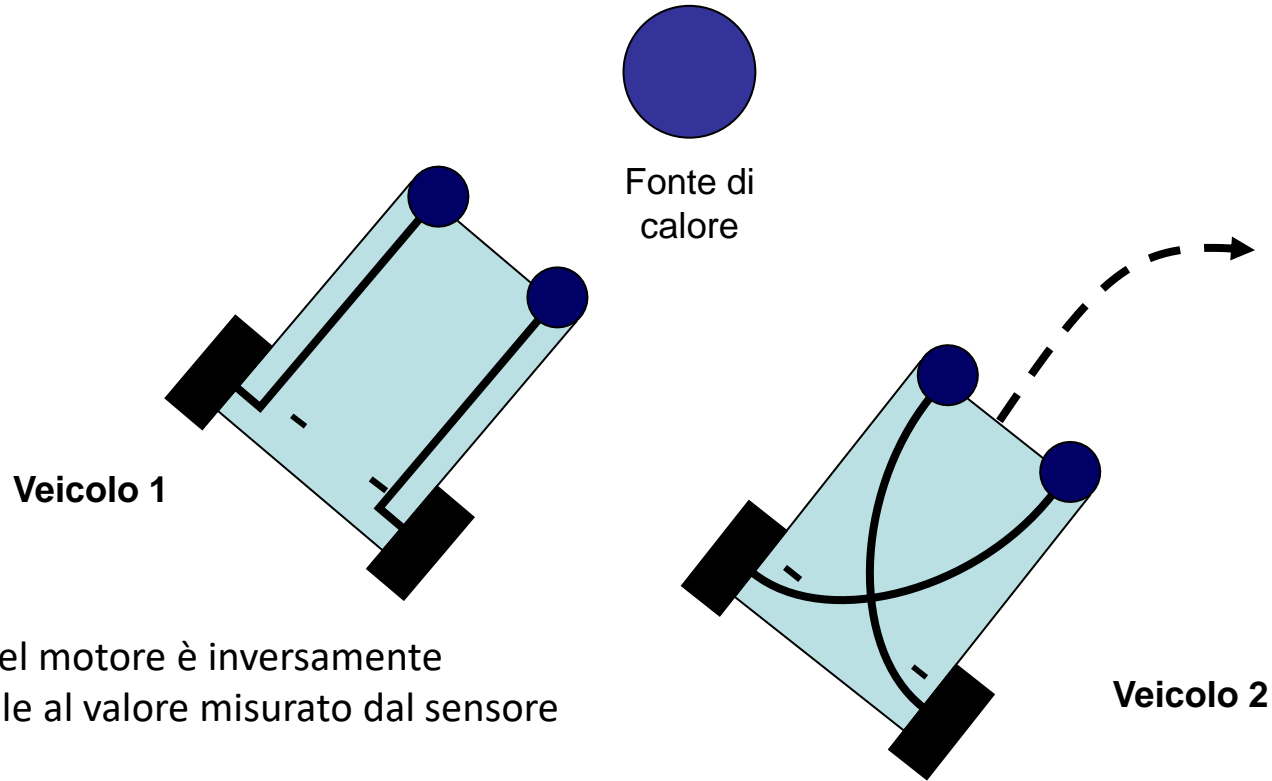
- Il secondo veicolo è equipaggiato con due motori e due sensori, due coppie diverse per ogni lato del veicolo
- Ancora una volta i motori sono collegati ai sensori ed il collegamento è tale che la forza esercitata dal motore è proporzionale al valore misurato dal sensore
- Seguendo questo schema è possibile costruire due veicoli che assumono due comportamenti diversi a seconda del tipo di connessione sensori-motori



Esperimento 2: paura e aggressione



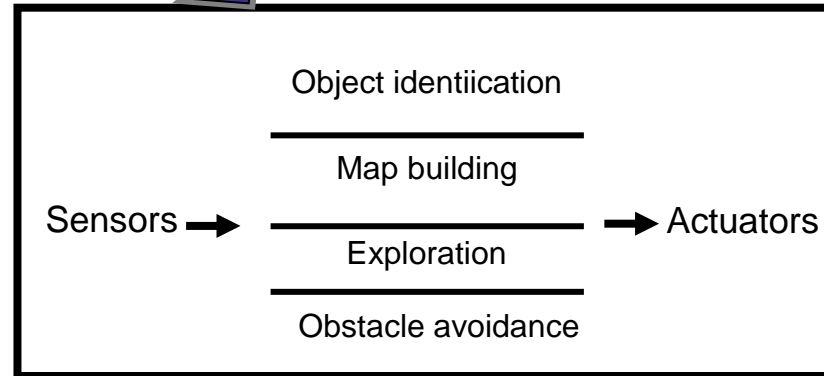
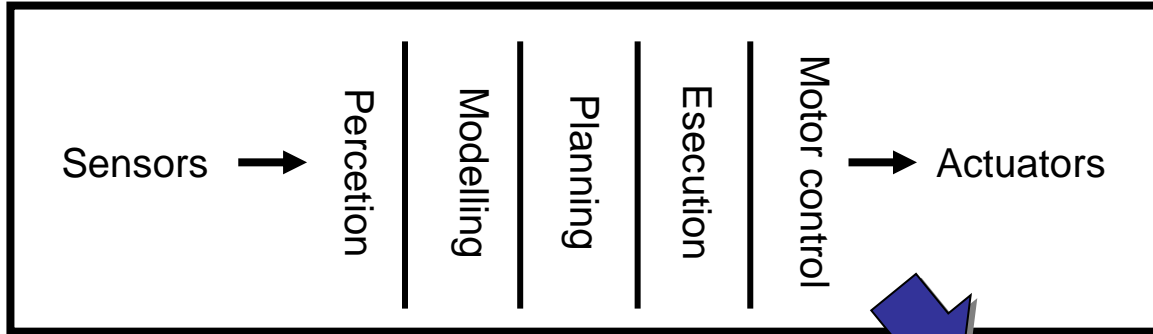
Esperimento 3: amore



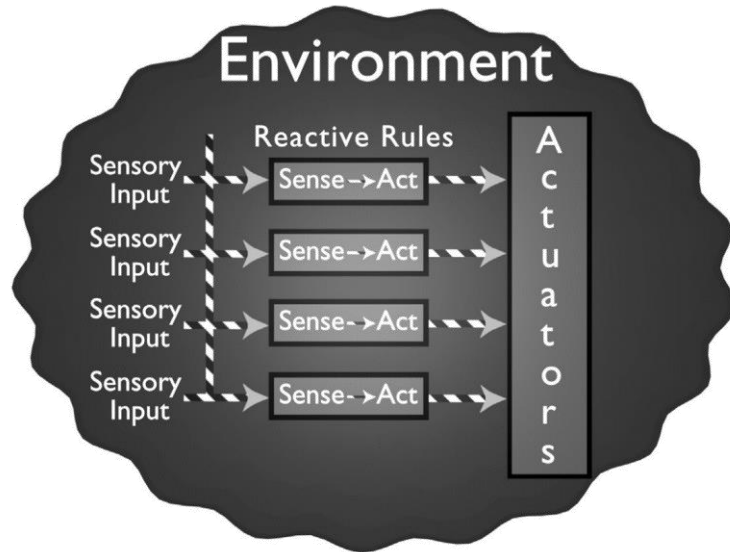
la velocità del motore è inversamente
proporzionale al valore misurato dal sensore



Dalle architetture gerarchiche alle architetture reattive



Architettura Reattiva



If left whisker bent, turn right.

If right whisker bent, turn left.

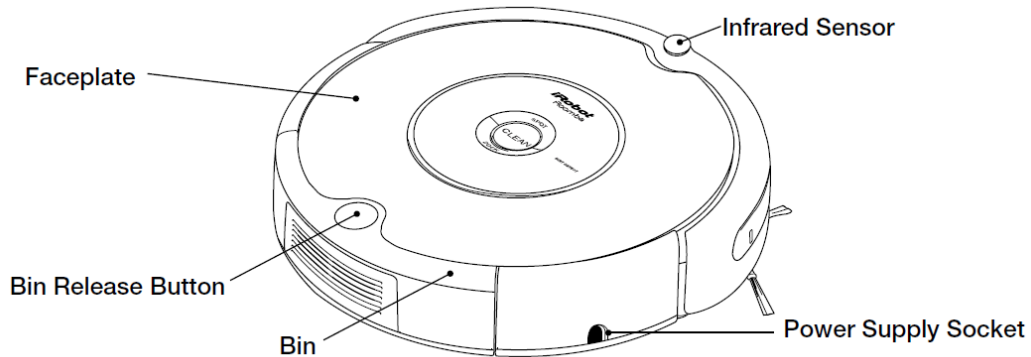
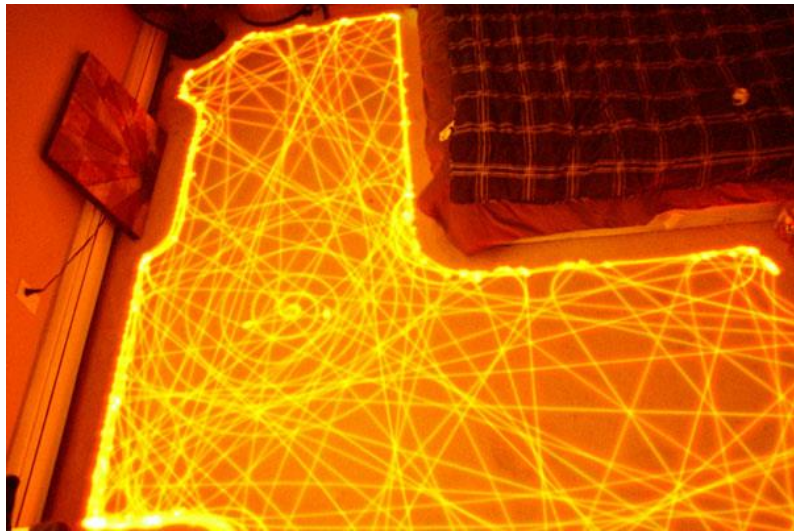
If both whiskers bent, back up and turn to the left.

Otherwise, keep going.



iRobot® Roomba®

Vacuum Cleaning Robot
with IntelliSense™

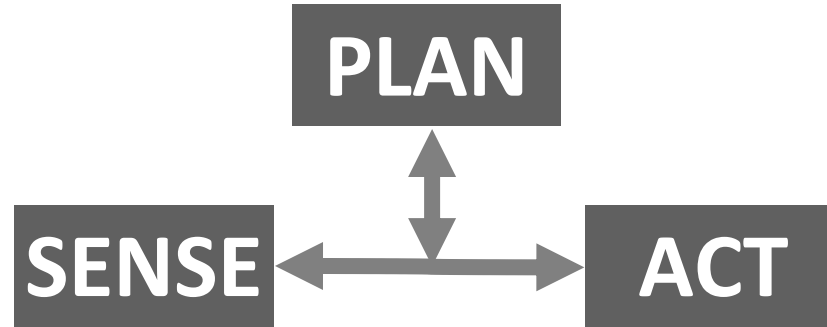


<https://www.youtube.com/watch?v=uCWeG3p5KJA>



Comportamento di un robot

Funzioni primitive



Architetture ibride






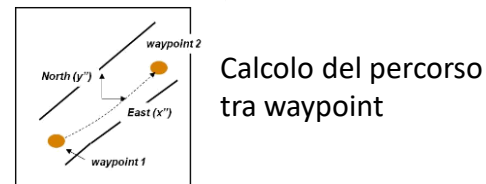
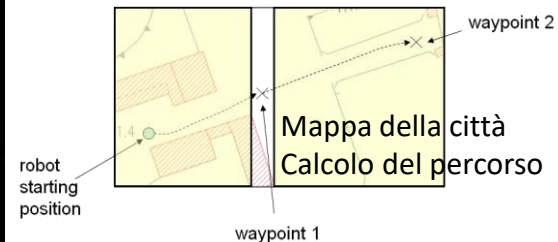
DustCart



Architettura del robot DustCart

PLAN

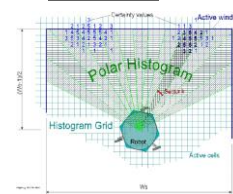
Stazione di controllo 



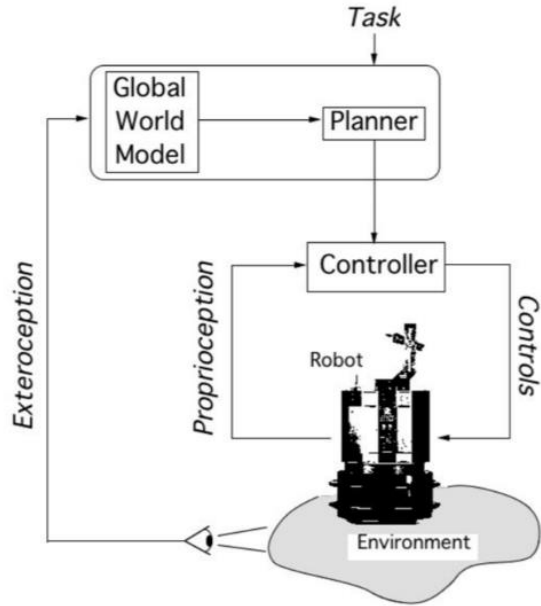
SENSE

ACT

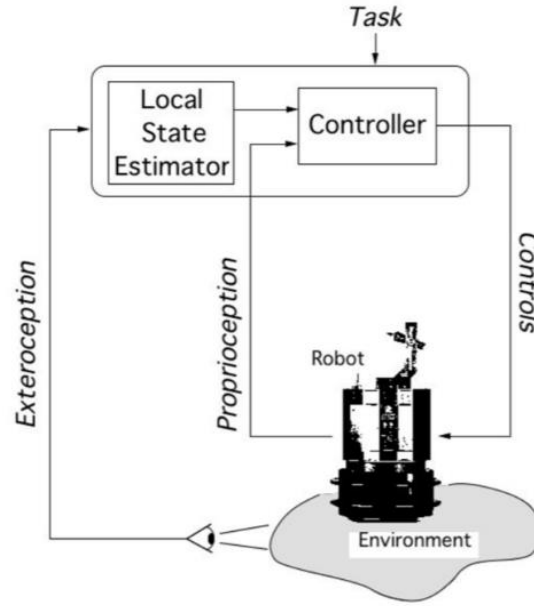
Evitamento ostacoli



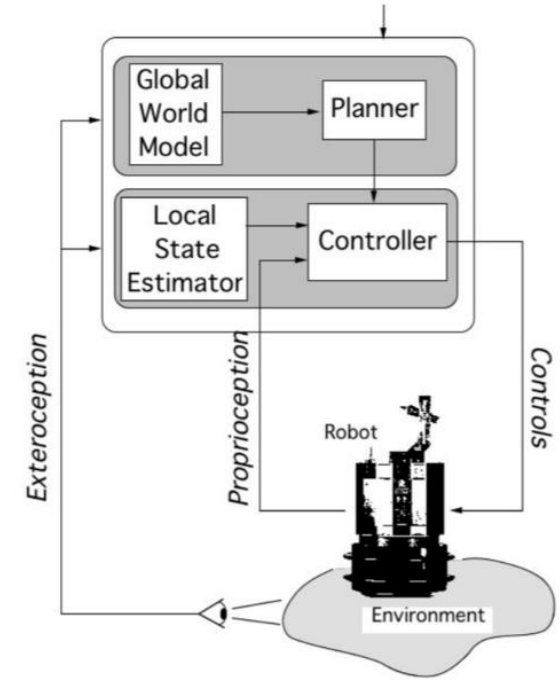
Architetture gerarchiche, reattive, ibride



Gerarchica



Reattiva

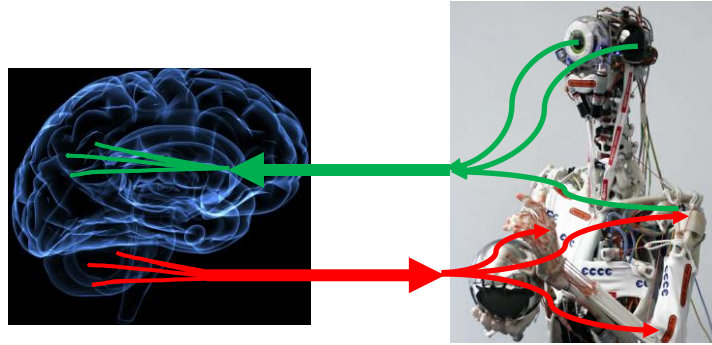


Ibrida

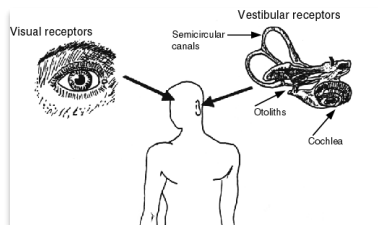


Neurorobotica

- La conoscenza del cervello umano al servizio dei robot

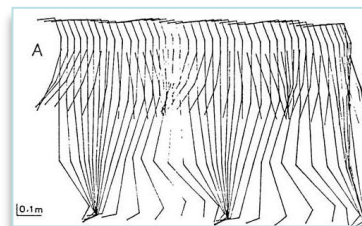


Principi di neuroscienze per robot umanoidi



Integrazione sensoriale

Meccanismi di stabilizzazione



Stabilizzazione della testa Stabilizzazione della testa nei robot

A robotic implementation of a bio-inspired head motion stabilization model on a humanoid platform

IROS 2012

2012.03.10
Waseda University, Takanishi Laboratory
WABIAN-2R

Comportamento predittivo



Inseguimento oculare



Inseguimento oculare robot



Comportamento predittivo

[E. Falotico, A. Berthoz, P. Dario, C. Laschi, Sense of movement: simplifying principles for humanoid robots, Science Robotics

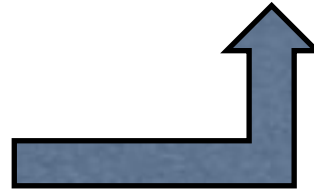
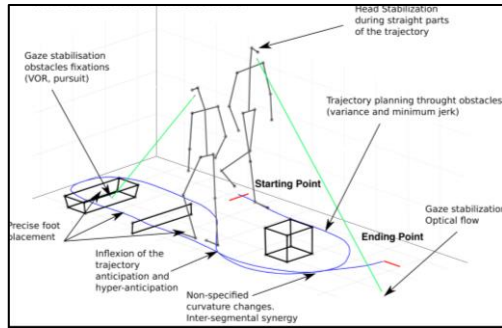
[Berthoz A. (2002) *The sense of movement*. Harvard University Press

[L. Vannucci, E. Falotico, S. Tolu, V. Cacucciolo, P. Dario, H. H. Lund, C. Laschi, (2017), A comprehensive gaze stabilization controller based on cerebellar internal models, *Bioinsp. & Biomim* 12(6), 065001

N. Cauli, E. Falotico, A. Bernardino, J. Santos-Victor, C. Laschi, (2016), Correcting for changes: expected perception-based control for reaching a moving target, *IEEE Robotics and Automation Magazine* 23(1), 63-70



Imparare dallo studio del comportamento umano



Infographic showing a robot and its various capabilities. The robot is a humanoid figure with a white head and torso, and a black body. The capabilities are listed in a vertical column on the left, with corresponding images in hexagonal frames:

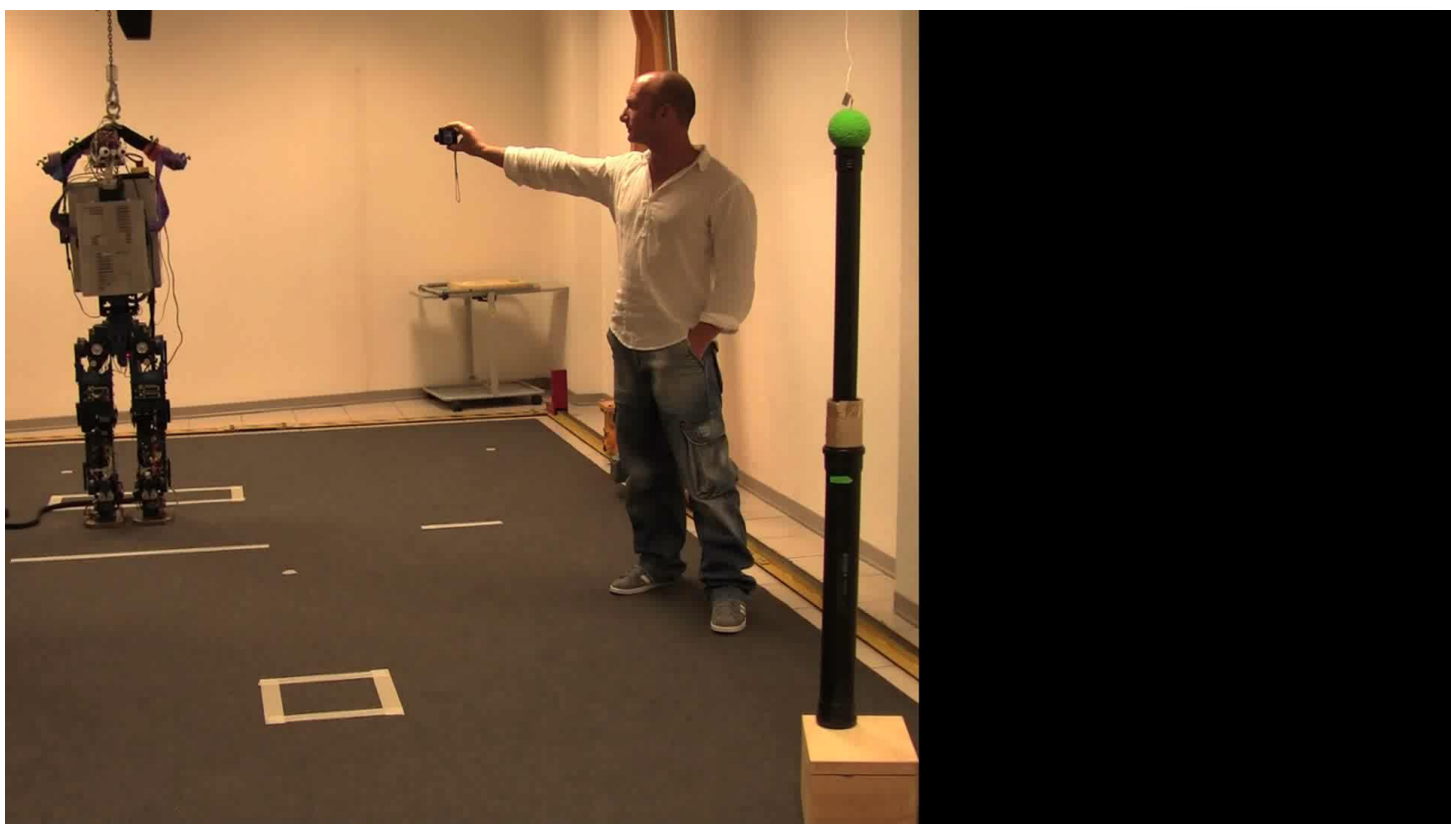
- EYE MOVEMENTS**: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE MAIN HUMAN EYE MOVEMENT MODELS (SMOOTH PURSUIT, SACCADIC AND VESTIBULO-OCULAR REFLEX) FOR IMPROVING THE PERCEPTION OF THE ENVIRONMENT.
- PREDICTIVE BEHAVIOUR**: PREDICTING SENSORY SYSTEMS IN ORDER TO DEAL WITH A CONSTANTLY CHANGING ENVIRONMENT. PREDICTIONS ARE OBTAINED USING INTERNAL MODELS WHICH REPRESENT THE BODY AS WELL AS EXTERNAL OBJECT DYNAMICS.
- GAZE/HEAD STABILIZATION**: IN ORDER TO IMPROVE VISUALLY GUIDED LOCOMOTION HEAD AND GAZE STABILIZATION MECHANISMS ARE MODELLED AND IMPLEMENTED. THESE MODELS GUARANTEE A STABLE CAMERA VISION.
- LOCOMOTION**: PERFORMING LOCOMOTION IN AN UNSTRUCTURED ENVIRONMENT NEEDS ONLINE TRAJECTORY GENERATION TO OVERCOME UNFORSEEN OBSTACLES AND STABLE WALKING ALGORITHMS.

Labels for the robot's capabilities: PREDICTIVE BEHAVIOUR, EYE MOVEMENTS, GAZE/HEAD STABILIZATION, LOCOMOTION.



Experiments conducted in collaboration with College de France, Paris





Cammino per raggiungere un target

RoboSOM EU ICT-Ch2 Project



Inseguimento di un target in movimento



The visual target is at 1.580 m in front and 0.6 m on the left. When the robot is near the first target position, the target is moved in another position (0, 3.5 m).

Active modules:

Foot placement generation

Head/gaze stabilization

Trajectory planning

Eye movements

On-line trajectory generation

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>
Time to reach the target	28.8 s
Number of steps	27
ZMP x position error	0.047
ZMP y position error	0.038

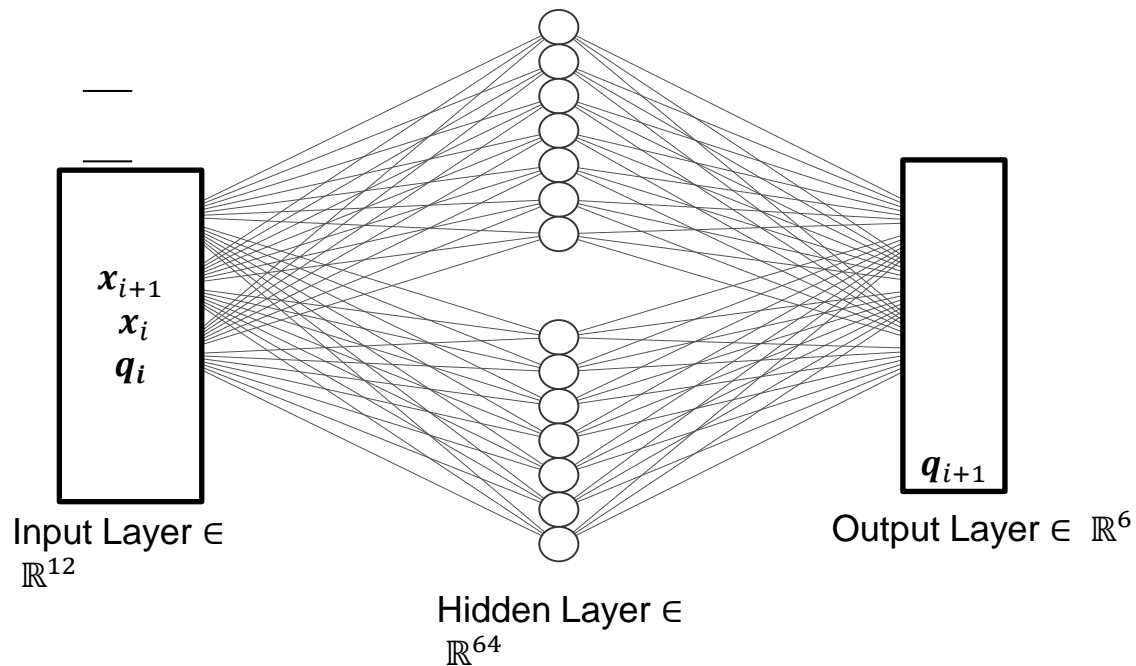


Modelli del cervello per controllo di robot

IMPARARE DAL MOVIMENTO

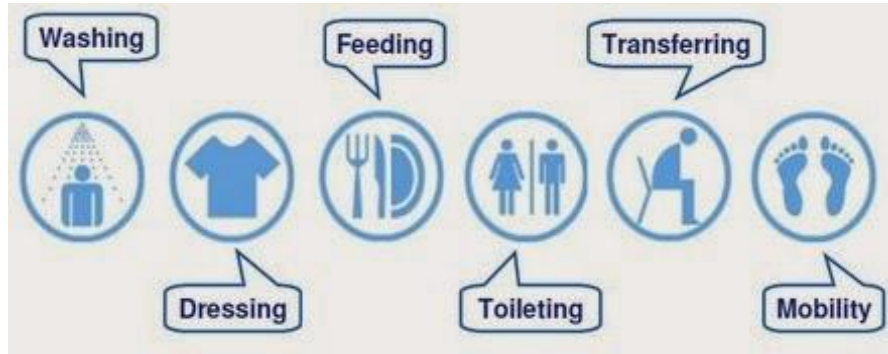


LEARNING



Motivazione

Activities of daily living



Bathing activity is a critical and high-risk ADL in elderly people

1	Bathing
2	Dressing
3	Toilet
4	Transferring
5	Continenca
6	Feeding

Most complex &
Least basic

Least complex &
Most basic



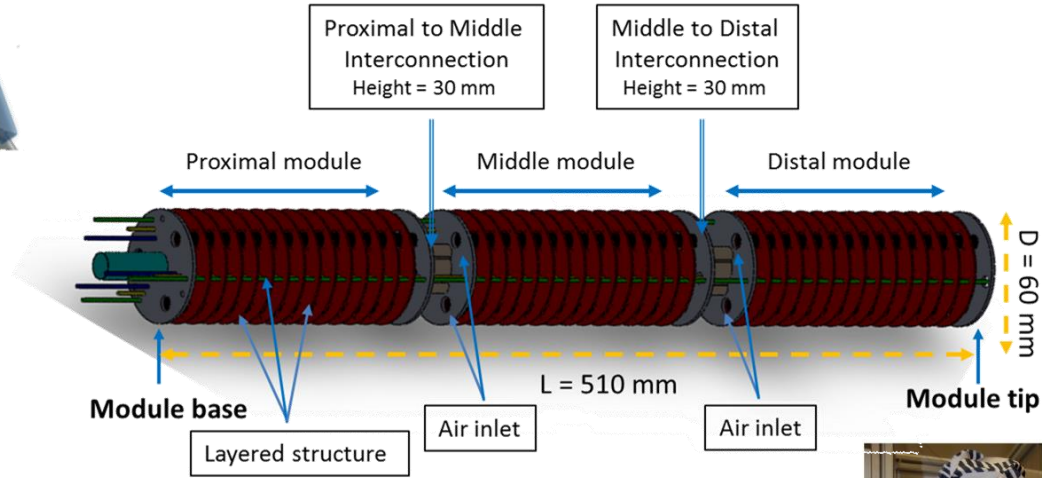
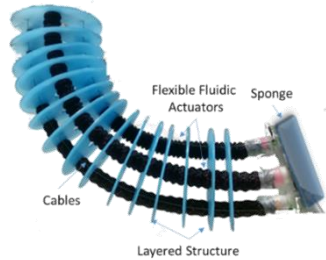
Use ICT and robotics to address bathing dependence:

- Autonomy
- Independence
- Reduced supervision
- Reduced costs

“Bathing/Showering (d510)” in the International Classification of Function, Disability and Health (ICF) Core Sets



I-Support: Robot soft per la doccia



Approccio modulare



Capacità del robot I-SUPPORT



FEATURES

Maximum reachable workspace:
 $60 \times 70 \times 35 \text{ cm}^3$ along XYZ

Effective workspace:
 $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$ along XYZ

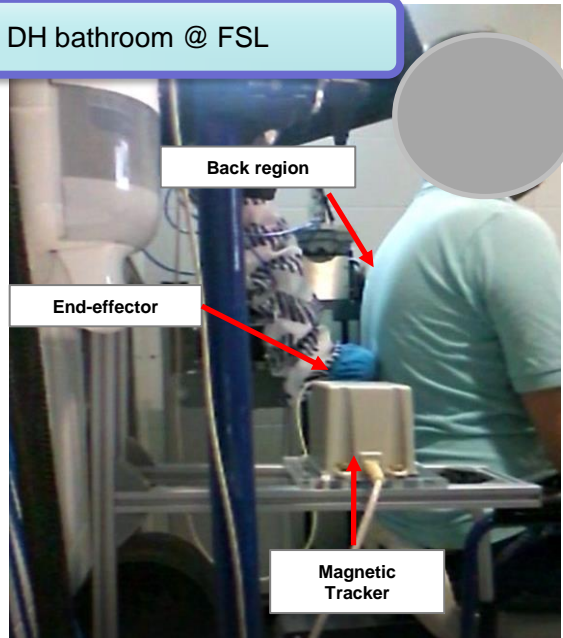
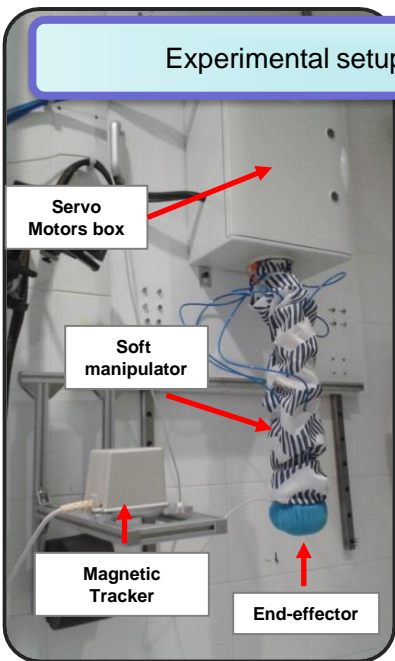
Position accuracy: $15\text{-}20 \text{ mm}$

Time response soft arm: 1.5 sec



Experimental trials

Experimental setup in DH bathroom @ FSL



Conclusioni

- Un robot si definisce come un agente fisico, autonomo, con sensori e attuatori per svolgere compiti
- I componenti principali sono i sensori, gli attuatori e il sistema di controllo che determina il comportamento del robot
- Il comportamento può essere programmato con architetture gerarchiche, reattive o ibride

