

Nome del Corso:

Robotica con Laboratorio (6cfu)

(primo modulo del corso [Automazione e Robotica con Laboratorio \(12cfu\)](#))

Docente:

Prof. [Francesco Martinelli](#)

francesco.martinelli@uniroma2.it

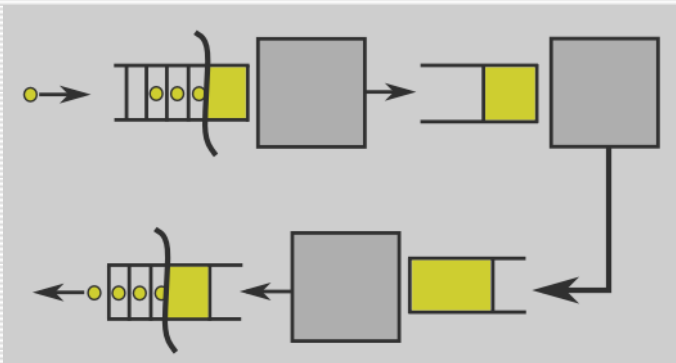
Automazione e Robotica con Laboratorio (12cfu)

**Automazione
Manifatturiera (6cfu)**

**Robotica con
Laboratorio (6cfu)**

Sito web Robotica con laboratorio:

<http://people.uniroma2.it/francesco.martinelli/RobLab/>



Sito web Automazione Manifatturiera:

<http://people.uniroma2.it/francesco.martinelli/AutMan/>

Modalità esame (1/2)

L'esame (di Robotica con Laboratorio) consiste in:

- una **prova scritta (2/3 voto)**;
- un lavoro a **progetto** realizzato in ambiente virtuale **Processing (1/3 voto)**;
- un **orale facoltativo**.

Alla prova scritta non è ammesso l'uso di appunti, testi, né altro materiale didattico. Sarà tuttavia ammesso un unico foglio formato A4 di appunti (formule, definizioni e quant'altro si ritenga utile ai fini del compito) scritto su entrambe le facciate.

Nella seconda metà di Novembre è prevista una prova di esonero sulla parte del modulo di Robotica.

Modalità esame (2/2)

Per chi deve effettuare l'**esame da 12 crediti** (Automazione e Robotica con Laboratorio) ci sono due possibilità:

1. fare lo scritto di AutMan e RobLab nello stesso appello (a tal fine ci sarà un compito misto per il quale saranno ammessi due fogli A4 di appunti);
2. fare separatamente le due prove scritte in due appelli diversi.

L'orale facoltativo per chi deve fare l'esame completo (da 12 cfu) verrà effettuato in base a come si è scelto di sostenere le prove scritte (se insieme o separatamente).

Robot = ...





Robot NAO (Aldebaran robotics, SoftBank Robotics dal 2016, Francia)

- 58cm, 5kg, ricerca e hobby, 7000 euro
- 25 gradi di libertà
- Sensori di prossimità a ultrasuoni e sensori di pressione sotto i piedi e sulla testa
- Dispone anche di un sistema multimediale evoluto (4 microfoni, due altoparlanti, due videocamere CMOS) per la sintesi vocale, la localizzazione nello spazio, e per il riconoscimento.

HRP-2M Choromet

- 35cm
- 5000 euro
- diversi sensori (accelerometri, giroscopi)
- applicazioni di ricerca (progetto giapponese per sviluppare robot di servizio nella casa)





Osservazione: movimentazione mediante **cingoli** o **ruote** meno complessa ma meno versatile rispetto alla movimentazione mediante **gambe**



Manipolatori didattici o industriali (alta ripetibilità, precisione e velocità)





AGV (Automated Guided Vehicles)

Guida mediante cavo, nastro, laser, visione, ecc.



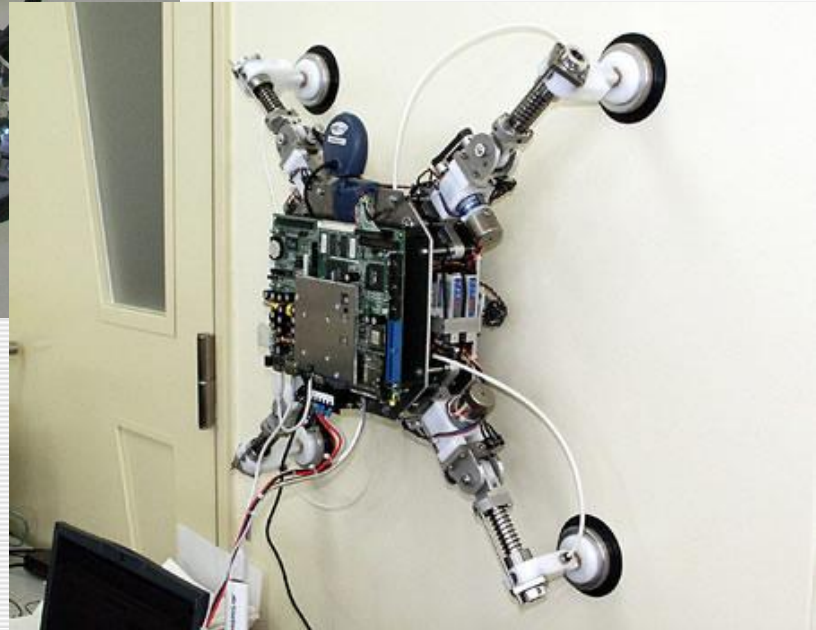
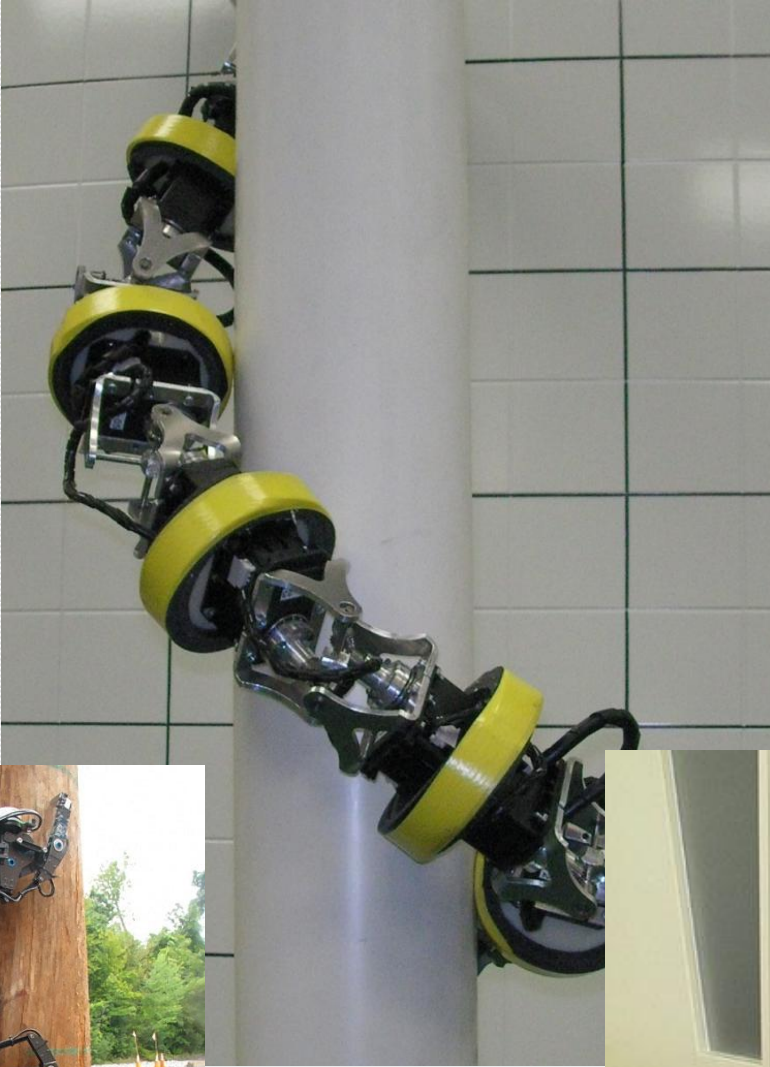
Aquabotix HydroView
(con telecamera, guidato via cavo)



**Robot sottomarino
della British Petroleum (2010)**

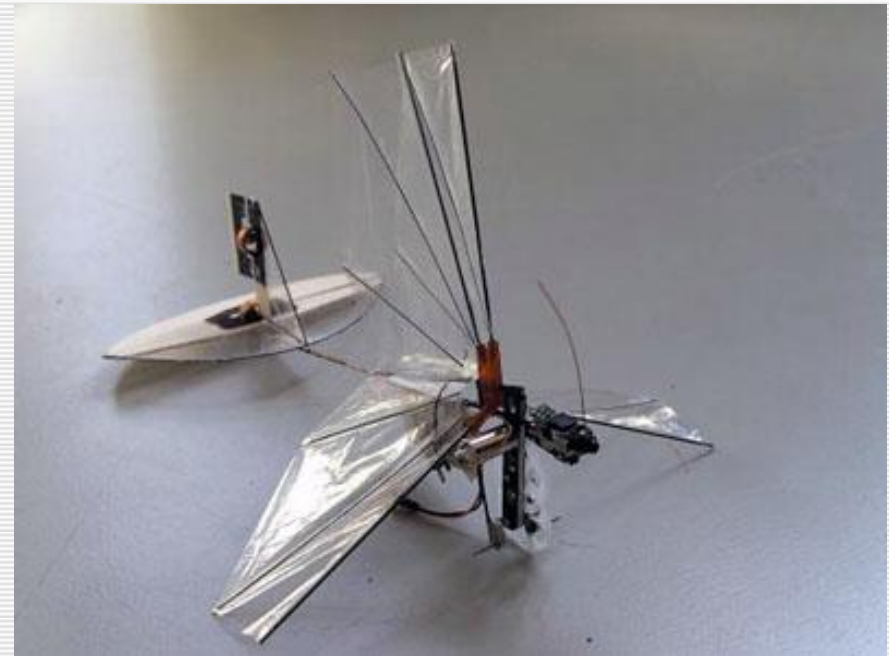


Climbing robots...





Snake robot (Norvegia)
7 kg, 1.5 m, ricerca e soccorso



XAircraft X650 QuadCopter

Robot Da Vinci





Alcuni robot in dotazione del Lab. di Robotica di Tor Vergata



Nomad 150, Lab. Robotica Tor Vergata

Alcuni robot in dotazione del Lab. di Robotica di Tor Vergata



Octagon



Scorbot



Nomad XR4000

Alcuni robot in dotazione del Lab. di Robotica di Tor Vergata



Alcuni robot in dotazione del Lab. di Robotica di Tor Vergata



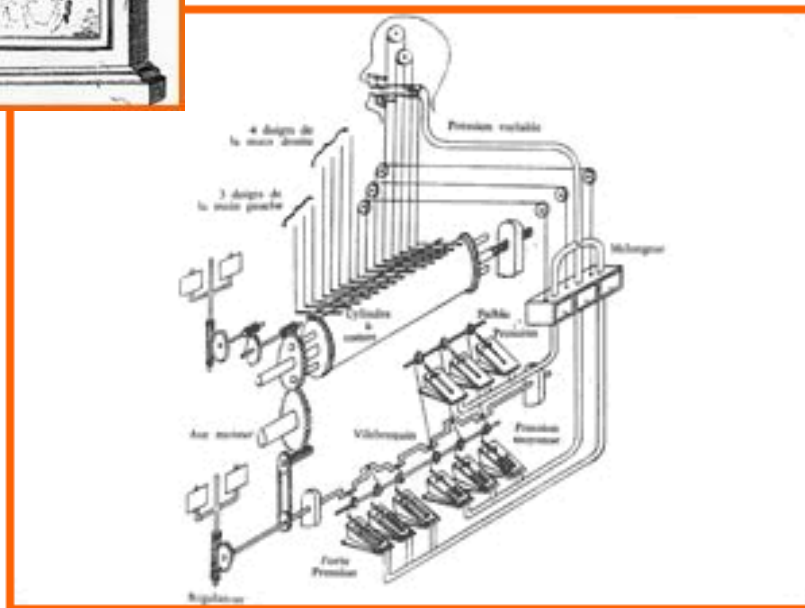
Origini e cenni storici...



Il cavaliere meccanico, progetto di Leonardo Da Vinci, 1495



Il flautista, Jacques de Vaucanson, 1738



Meccanismo del suonatore di flauto trverso
(automa creato da Vaucanson)

L'androide, alto 1,78 m, era seduto su una roccia posata su un piedistallo, come una statua. Il cofanetto, che racchiudeva gran parte del meccanismo del motore, conteneva un cilindro di legno di 56 cm di diametro e 83 di lunghezza che girava intorno al proprio asse. Munito di perni, trasmetteva impulsi a quindici levette che, tramite catene e fili, controllavano il livello dei serbatoi d'aria, il movimento delle labbra, della lingua e l'articolazione della dita.



**Gli automi di Droz
(Pierre Jaquet-Droz (1721–1790))**

Innocenzo Manzetti, 1848



- **TELE-operation:** capability of *performing remote manipulation*

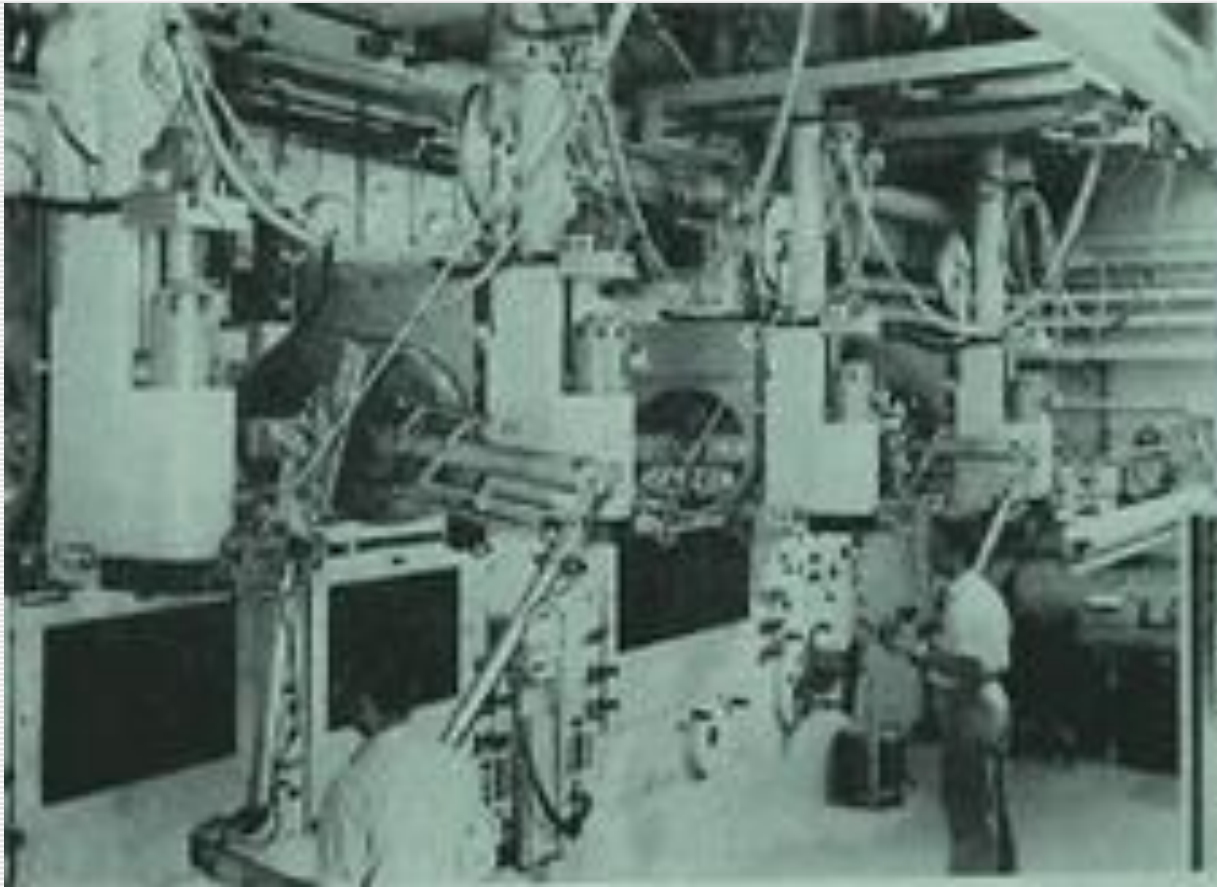


1940-1950 Raymond C. Goertz

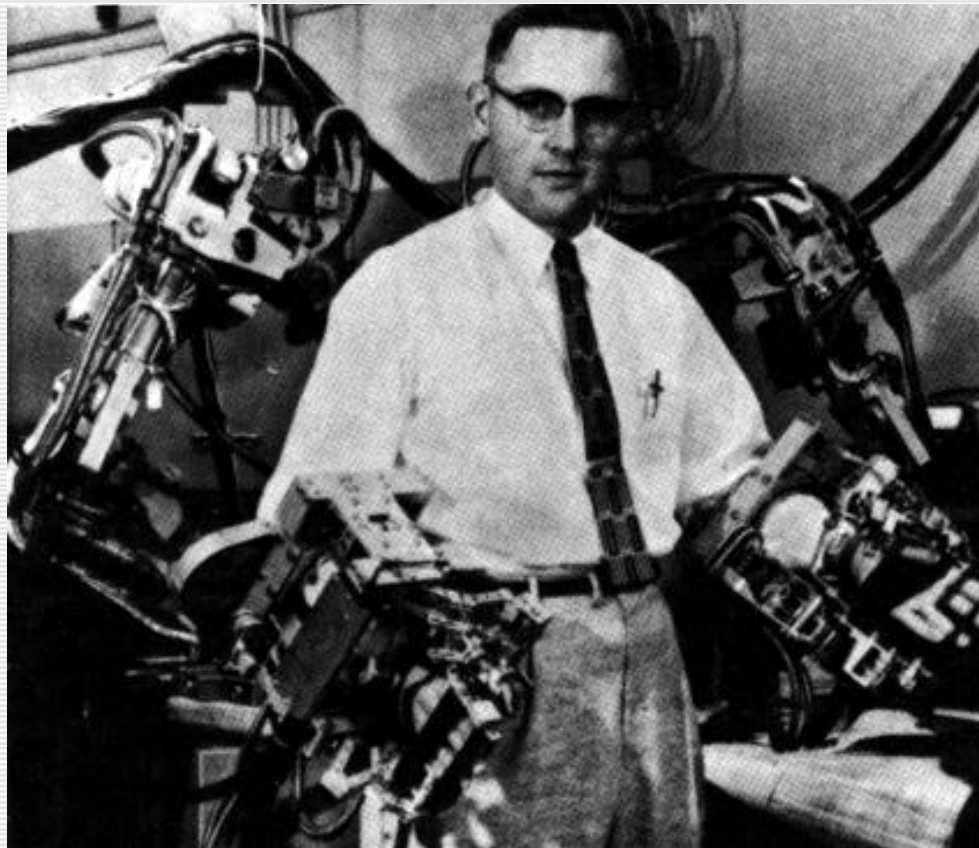
(Argonne Nat. Lab., Chicago (USA), where E. Fermi developed the first nuclear reactor)

This technology provides physical interaction capability at a distance

- **1954:** **electro-mechanical** master-slave teleoperator developed by Goertz at Argonne National Lab. (Chicago, USA)



- **60s:** Telepresence, **force reflection**, **two-arm** teleoperators. Touch sensing and display, a significant example is the Mosher's Handyman, developed at General Electric Co.



- **1965:** first experiments with relevant **time-delays** (race to the Moon); instability problems were firstly noticed in force reflection.

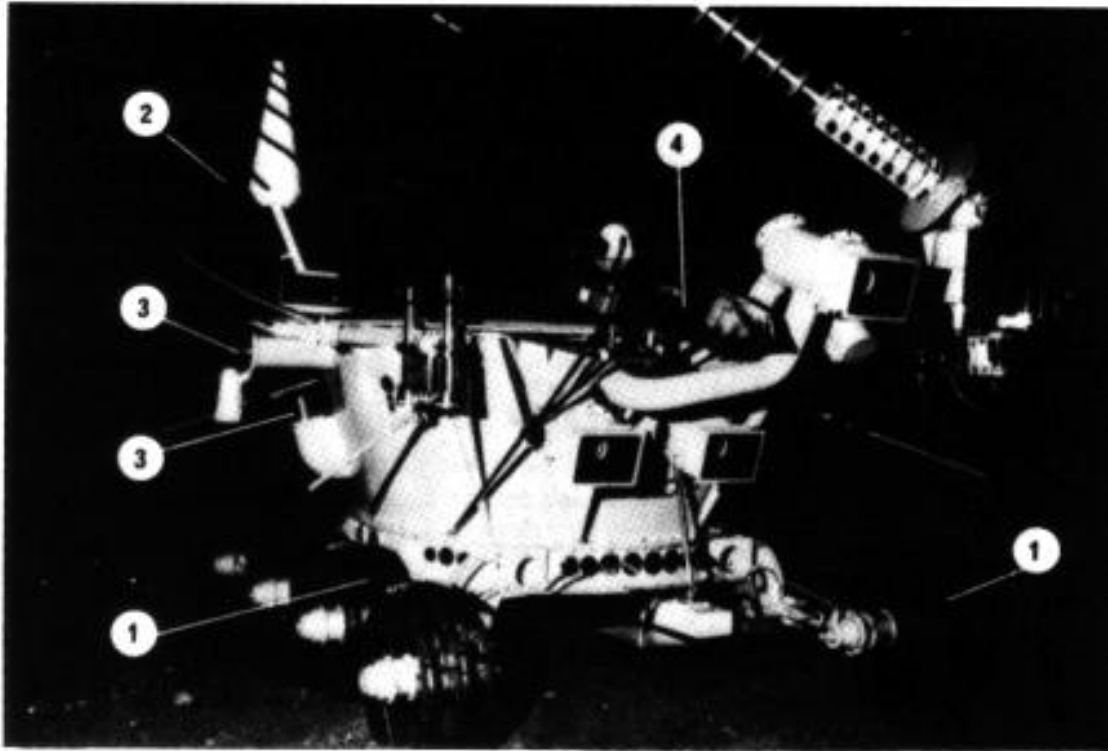


FIGURA 2.7

- **80s:** JPL ATOP Control Station (early 1980s). For space applications a dual-arm force reflecting telerobotic system had been developed by Bejczy et al. at JPL (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology). **For the first time kinematically and dynamically different master and slave systems are used**, requiring control in Cartesian space coordinates.



Master devices

Origini del termine robot...

Il termine *robot* deriva dal termine ceco *robota*, che significa "lavoro pesante" o "lavoro forzato" (al plurale in ceco è *roboty*, mentre in italiano è invariabile). L'introduzione di questo termine si deve allo scrittore ceco Karel *Capek*, il quale usò per la prima volta il termine nel 1920 nel suo dramma teatrale *I Robot Universali di Rossum*.

Il termine **robotica** venne usato per la prima volta (su carta stampata) nel racconto di Isaac **Asimov** intitolato "Bugiardo!" (*Liar!*, **1941**).

In esso, egli citava le *tre regole della robotica*, che in seguito divennero le **Tre leggi della robotica**:

1. Un robot non può recare danno a un essere umano, né può permettere che, a causa del proprio mancato intervento, un essere umano riceva un danno.
2. Un robot deve obbedire agli ordini impartiti dagli esseri umani, purché tali ordini non contravvengano alla Prima Legge.
3. Un robot deve proteggere la propria esistenza, purché tale autodifesa non contrasti con la Prima o con la Seconda Legge.

Definizione di robot...

Macchina artificiale (meccanica, elettromeccanica, ecc.) che possa **sostituire l'uomo** nell'esecuzione di un **compito**.

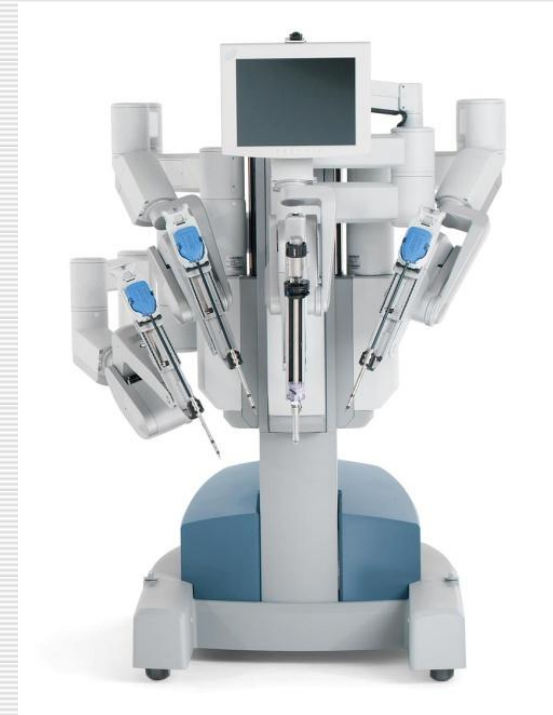
Capacità di **movimento** nello spazio di lavoro e di **interazione** con l'ambiente.

Livello di Autonomia...

- Teleoperato
(supervisione umana)



Nei moderni sistemi: supervisione umana con
interfaccia aptica



- Autonomo

open loop

Governo

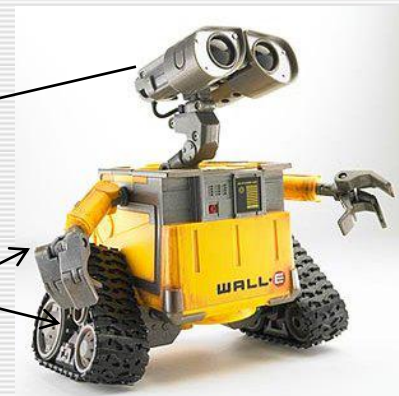


closed loop

Sensori

Governo

Attuatori



Classificazione...

Manipolatori



Robot mobili



Entrambe le cose...



Manipolatori

Catene cinematiche **aperte**



Catene cinematiche **chiuse**



Manipolatori (catene cinematiche aperte)

Giunti rotoidali e prismatici

Gradi di libertà e ridondanza

Spazio di lavoro e spazio di lavoro destro

Cinematica diretta e inversa

Pianificazione del moto (eventualmente con ostacoli)

Dinamica e controllo

Manipolatore

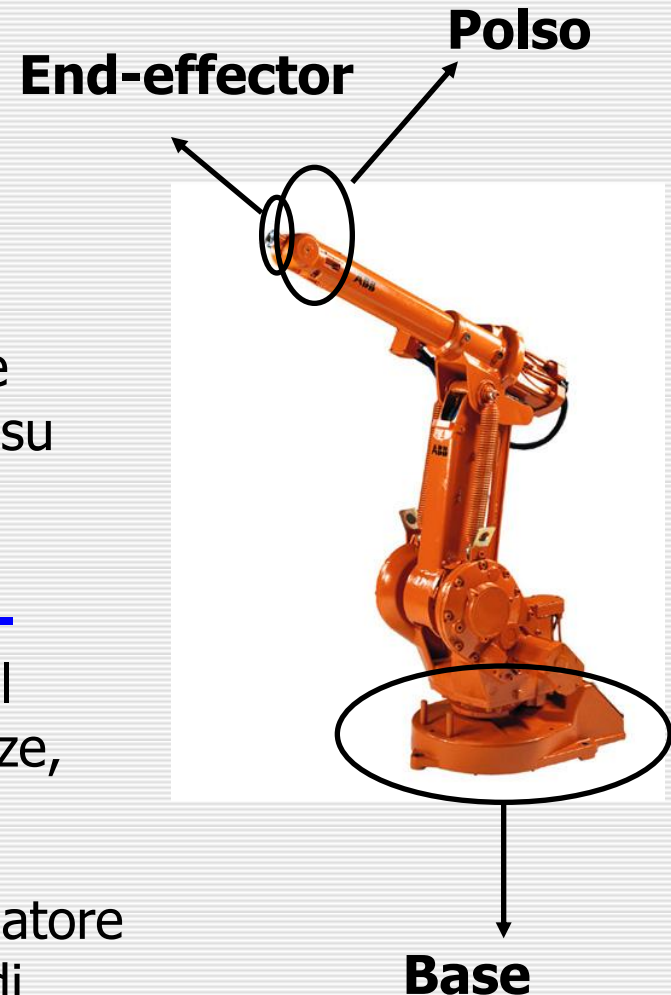
Il manipolatore è costituito da:

- una serie di corpi rigidi, detti **link**
- una serie di snodi attuati, detti **giunti**

Il manipolatore ha una **base** che può essere fissata nell'ambiente di lavoro oppure posta su una piattaforma mobile.

All'estremità del manipolatore è posto l'**end-effector**, cioè l'attrezzo con cui è eseguito il lavoro. Esistono vari tipi di end-effector: pinze, saldatori, mani,...

L'end-effector è spesso collegato al manipolatore tramite uno snodo, il **polso**, che consente di orientarlo arbitrariamente.



Manipolatori (catene cinematiche aperte)

Giunti rotoidali e prismatici

Gradi di libertà e ridondanza

Spazio di lavoro e spazio di lavoro destro

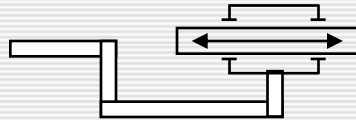
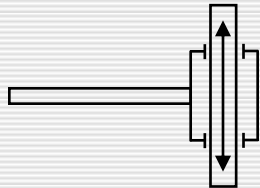
Cinematica diretta e inversa

Pianificazione del moto (eventualmente con ostacoli)

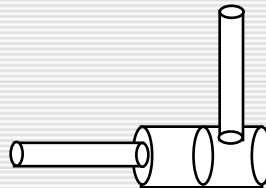
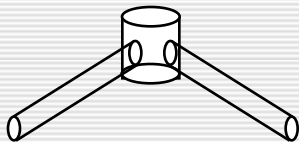
Dinamica e controllo

Ci sono due tipi fondamentali di giunto:

- **giunto prismatico**, il cui moto è una traslazione (giunto T)
- **giunto rotoidale**, il cui moto è una rotazione (giunto R)



Giunti prismatici



Giunti rotoidali



Giunti più complessi (sferici, elicoidali, ...) possono essere ottenuti mediante opportune combinazioni di giunti rotoidali e giunti prismatici.

Manipolatori (catene cinematiche aperte)

Giunti rotoidali e prismatici

Gradi di libertà e ridondanza

Spazio di lavoro e spazio di lavoro destro

Cinematica diretta e inversa

Pianificazione del moto (eventualmente con ostacoli)

Dinamica e controllo

Il numero dei **gradi di libertà** di un manipolatore coincide con il numero dei suoi giunti. Se un manipolatore ha n giunti allora la sua configurazione è completamente individuata dal valore di n variabili, ciascuna associata ad un particolare giunto.

- Per un manipolatore, il numero di gradi di libertà n può essere qualsiasi. La dimensione dello spazio di lavoro al massimo è $m=6$.
- Un caso molto comune è $m=n$, cioè il manipolatore ha un numero di gradi di libertà coincidente con la dimensione dello spazio di lavoro. In tal caso, se i giunti sono disposti in modo da evitare situazioni singolari, l'end-effector può essere portato in qualsiasi punto dello spazio di lavoro con qualsiasi orientamento.

- Se $n < m$, allora si parla di **manipolatori difettivi**, cioè tali per cui l'end-effector **non** può essere portato in ogni punto dello spazio di lavoro con qualsiasi orientamento.
- Se $n > m$, allora si parla di **manipolatori ridondanti**, cioè tali per cui l'end-effector può essere portato in ogni punto dello spazio di lavoro con qualsiasi orientamento in più modi (sempre a patto che la struttura non sia singolare).

Manipolatori (catene cinematiche aperte)

Giunti rotoïdali e prismatici

Gradi di libertà e ridondanza

Spazio di lavoro e spazio di lavoro destro

Cinematica diretta e inversa

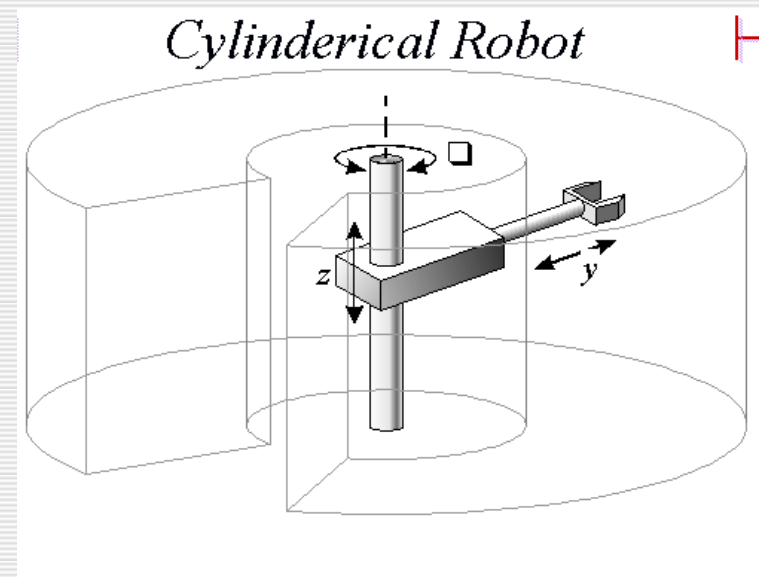
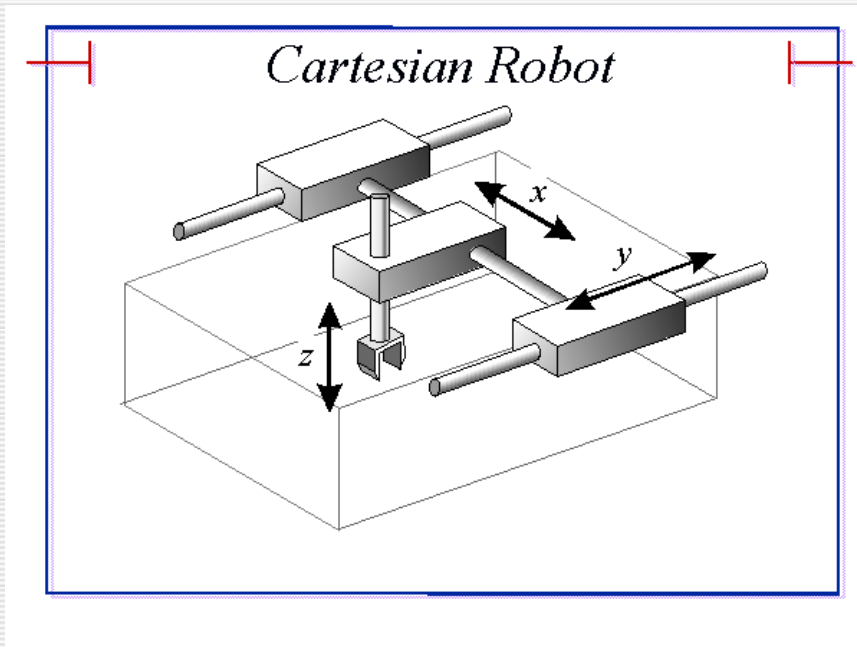
Pianificazione del moto (eventualmente con ostacoli)

Dinamica e controllo

Spazio di lavoro

Lo **spazio di lavoro** di un robot è l'insieme dei punti raggiungibili dall'end-effector del robot. Esso dipende dalle dimensioni dei link, dal tipo di giunti e dal loro limite di movimento.

Lo **spazio di lavoro destro** è l'insieme dei punti raggiungibili dall'end-effector con qualsiasi orientamento desiderato.



Spazio di giunto

- Solitamente ogni giunto è motorizzato ed è, quindi, possibile controllarne la posizione.
- Ad ogni giunto è associata una variabile di giunto q_i che rappresenta la posizione relativa del link i -esimo rispetto a quello $(i-1)$ -esimo

Tutte le possibili configurazioni che può assumere un robot costituiscono lo **spazio di giunto**

Un robot può avere in generale n giunti e, quindi, lo spazio in cui vivono le variabili di giunto è in generale \mathbf{R}^n

$$q = \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n$$

Manipolatori (catene cinematiche aperte)

Giunti rotoidali e prismatici

Gradi di libertà e ridondanza

Spazio di lavoro e spazio di lavoro destro

Cinematica diretta e inversa

Pianificazione del moto (eventualmente con ostacoli)

Dinamica e controllo

Il problema cinematico

La parte del robot che interessa controllare (cioè quella che compie lavoro) è l'end-effector.

Posizione e orientamento dell'end-effector sono funzioni in generale NON LINEARI delle variabili di giunto.

$$p = f(q_1, \dots, q_n)$$

Determinare la configurazione dell'end-effector a partire dalla configurazione dei giunti e viceversa è un **problema cinematico** (rispettivamente **diretto** e **inverso**).

Manipolatori (catene cinematiche aperte)

Giunti rotoïdali e prismatici

Gradi di libertà e ridondanza

Spazio di lavoro e spazio di lavoro destro

Cinematica diretta e inversa

Pianificazione del moto (eventualmente con ostacoli)

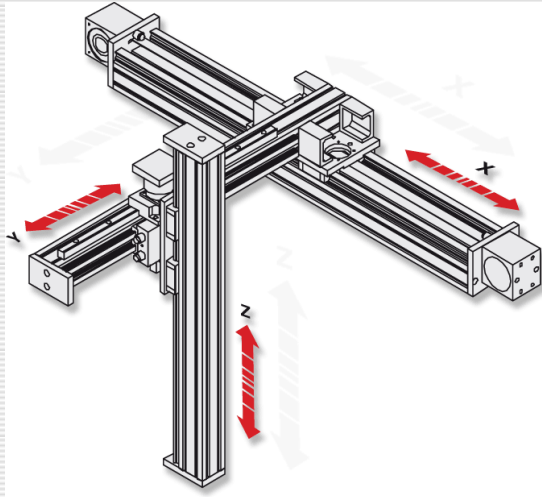
Dinamica e controllo

Manipolatori: alcune strutture

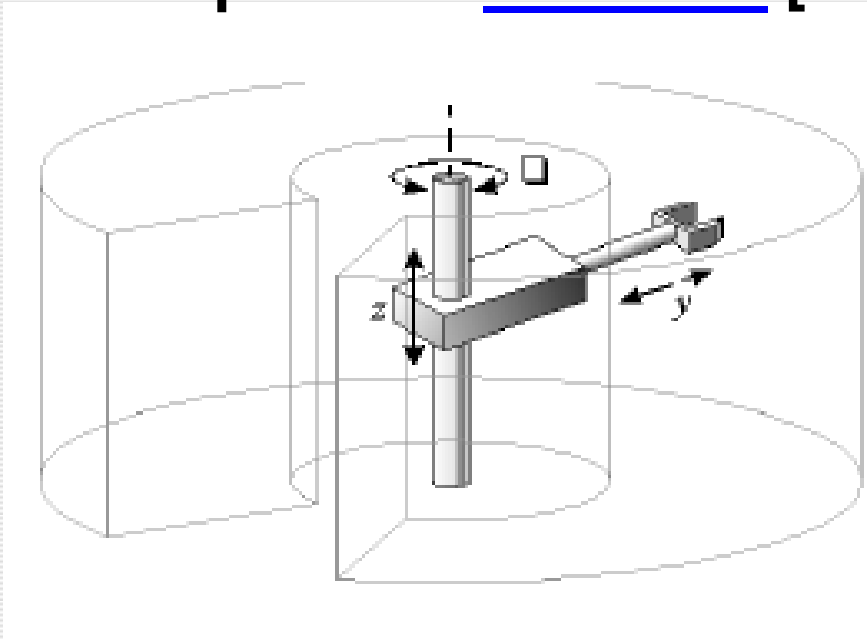
Manipolatore antropomorfo
(robot articolato) [59%]



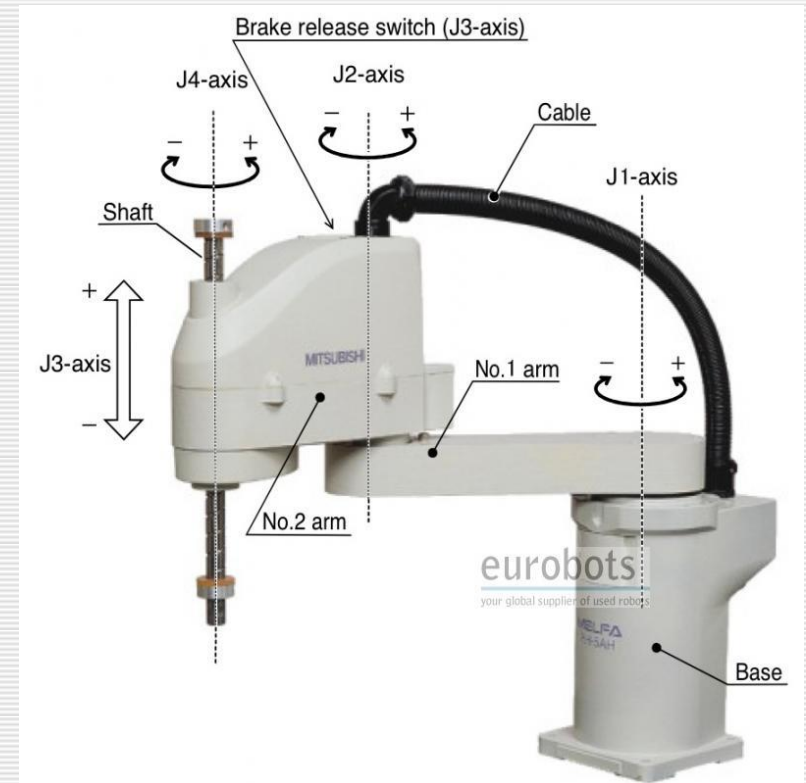
Manipolatore cartesiano [20%]



Manipolatore cilindrico [12%]

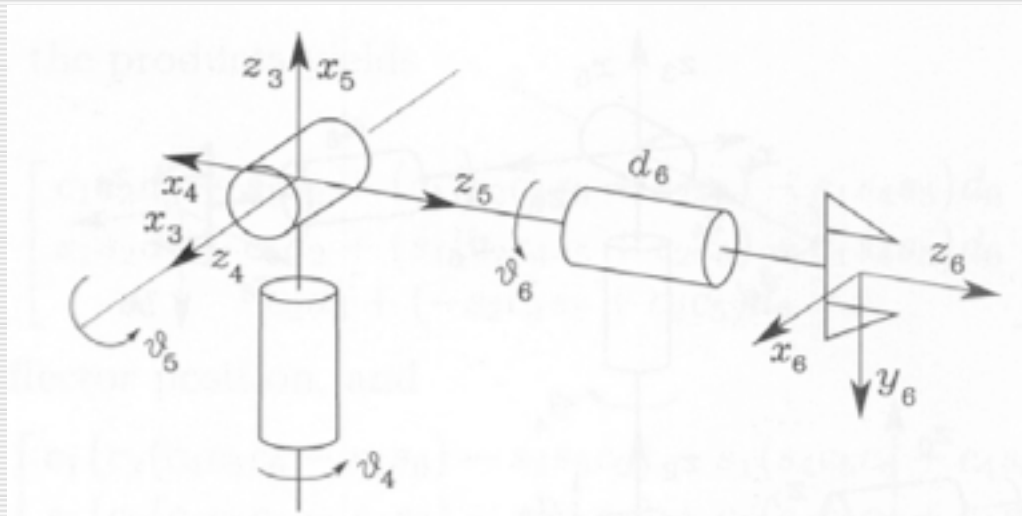


Manipolatore SCARA [8%]



Polso sferico

I tre assi di rotazione si intersecano in un punto.
Posizionato all'estremità del manipolatore
permette di disaccoppiare il posizionamento e
l'orientamento dell'organo terminale



Robot mobili

Escludendo veicoli che si muovono in acqua o in aria, o con movimento ondulatorio (serpenti), oppure cingolati, si distinguono i seguenti due tipi di veicoli:

Su ruote



Su gambe



Robot mobili su ruote...

Ruote **fisse** e **orientabili**

Ruote **castor** e **multidirezionali** (mecanum o omni wheel)



Ruota castor



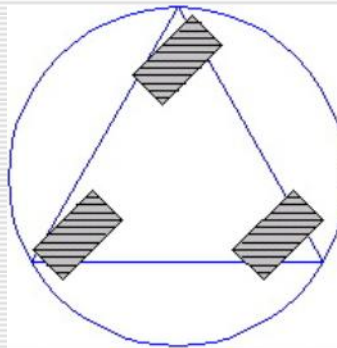
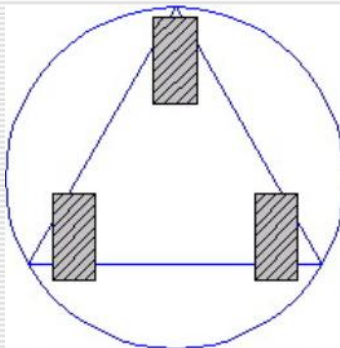
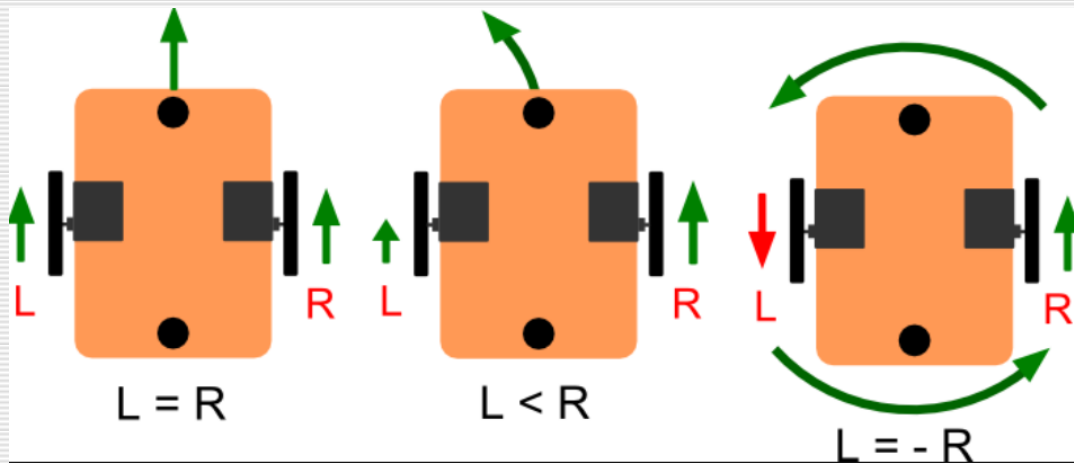
Omni wheel

Mecanum



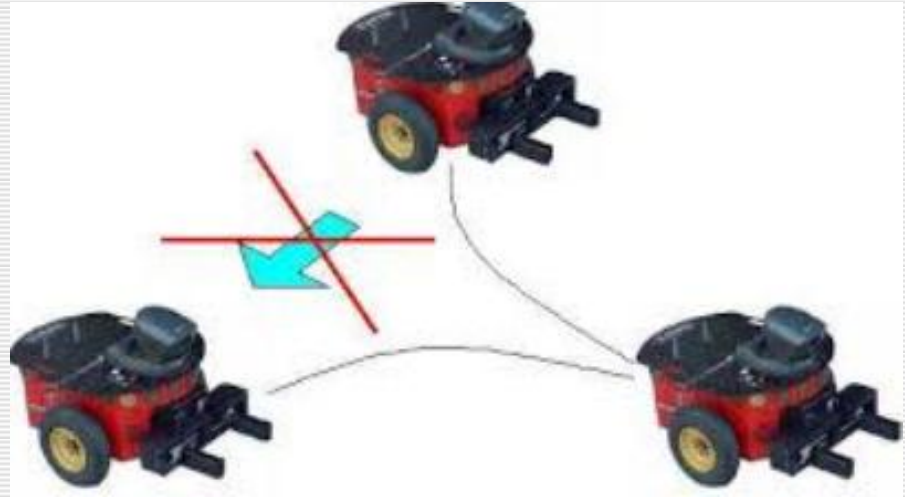
Robot mobili su ruote...

Cinematica di tipo *uniciclo*: trazione **differenziale** (differential drive) e trazione **sincronizzata** (synchro drive)



Robot mobili su ruote...

Vincoli **non oloноми**



Problematiche di un robot mobile:

- **modellazione** e **controllo** di posizione;
- **localizzazione** (ed eventualmente costruzione mappe);
- pianificazione del percorso (ostacoli e/o vincoli!);
- pianificazione della traiettoria (limiti dinamici);
- controllo (inseguimento della traiettoria)

Localizzazione di un robot mobile:

- Position tracking
- Localizzazione Globale
- Problema Kidnap



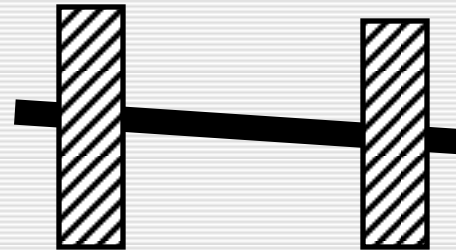
Difficoltà crescente



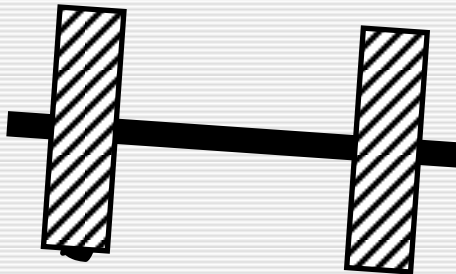
Sorgenti di rumore sull'odometria...



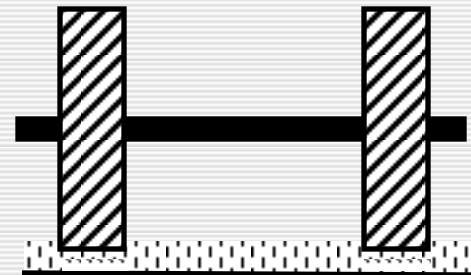
caso ideale



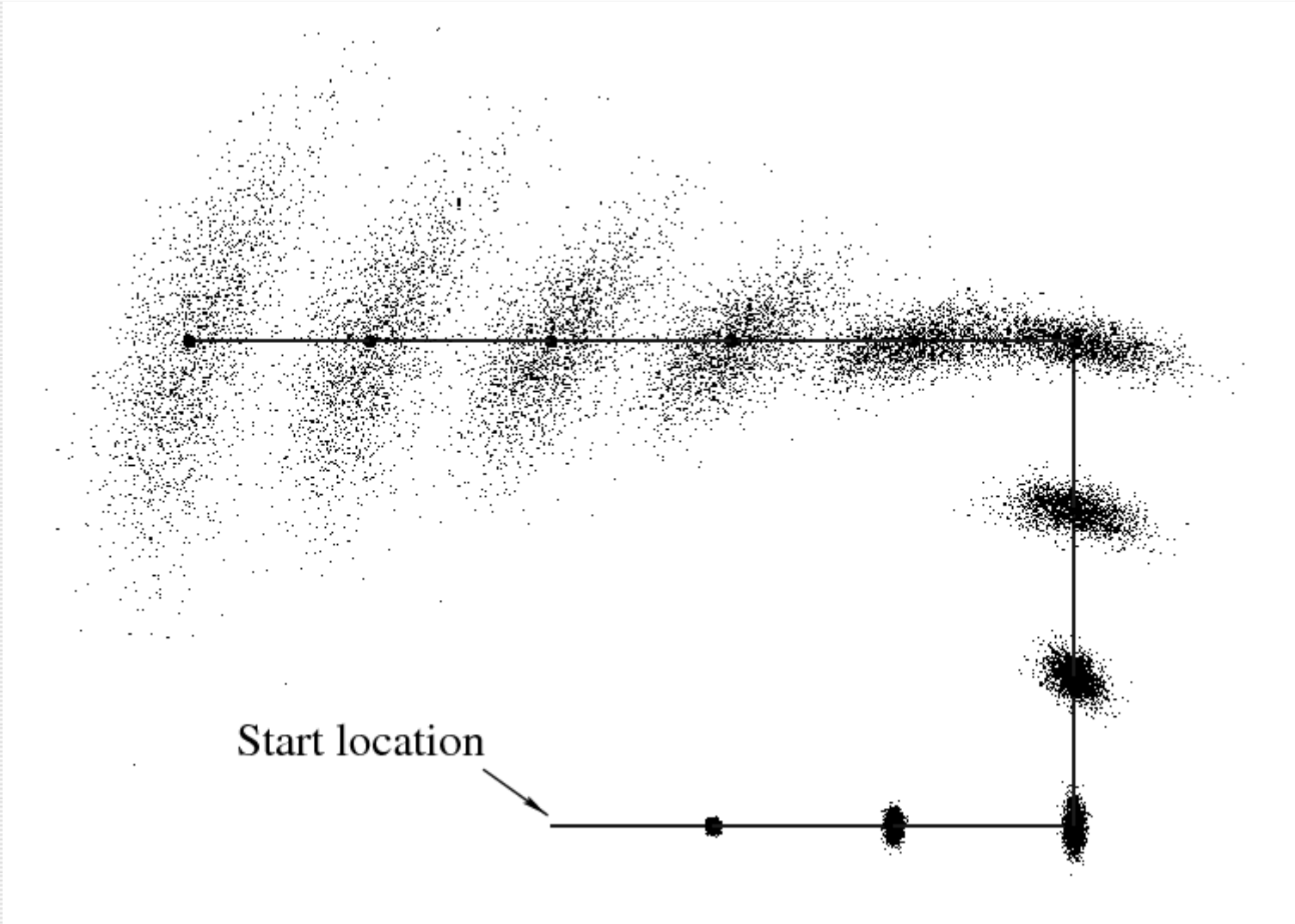
Diverso diametro (errore sistematico)



Ostacolo (errore casuale)

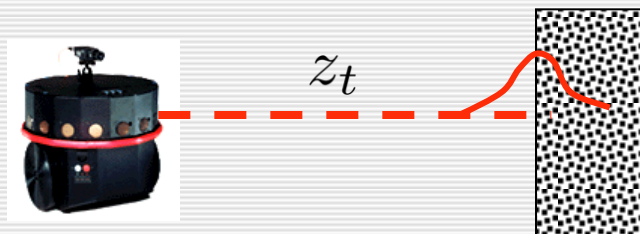


Terreno scivoloso (errore casuale)

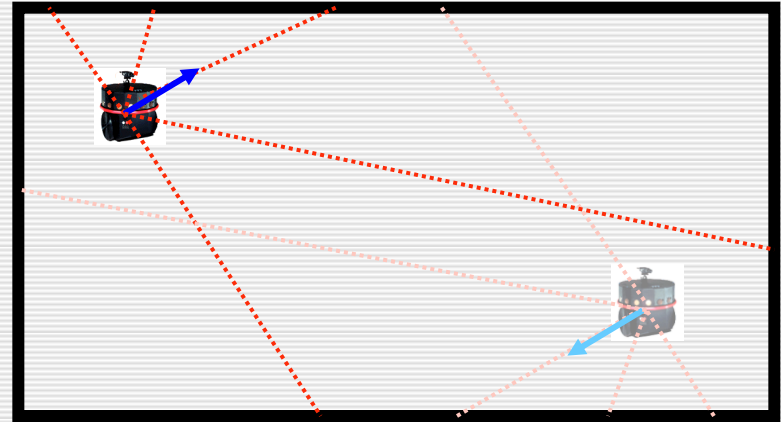
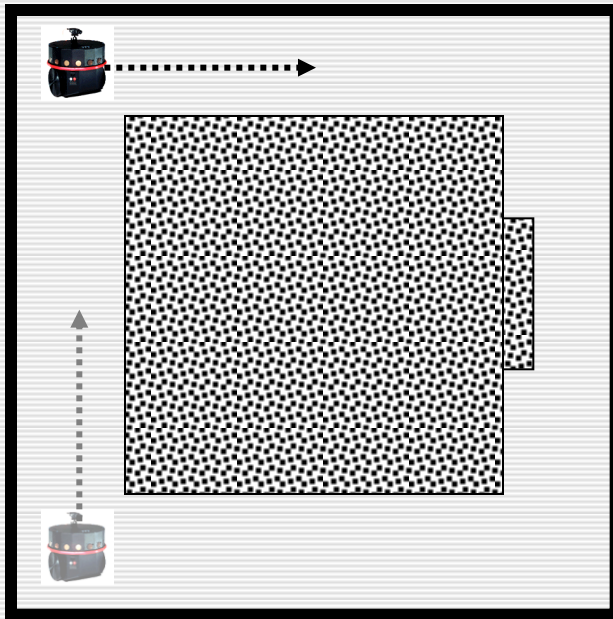


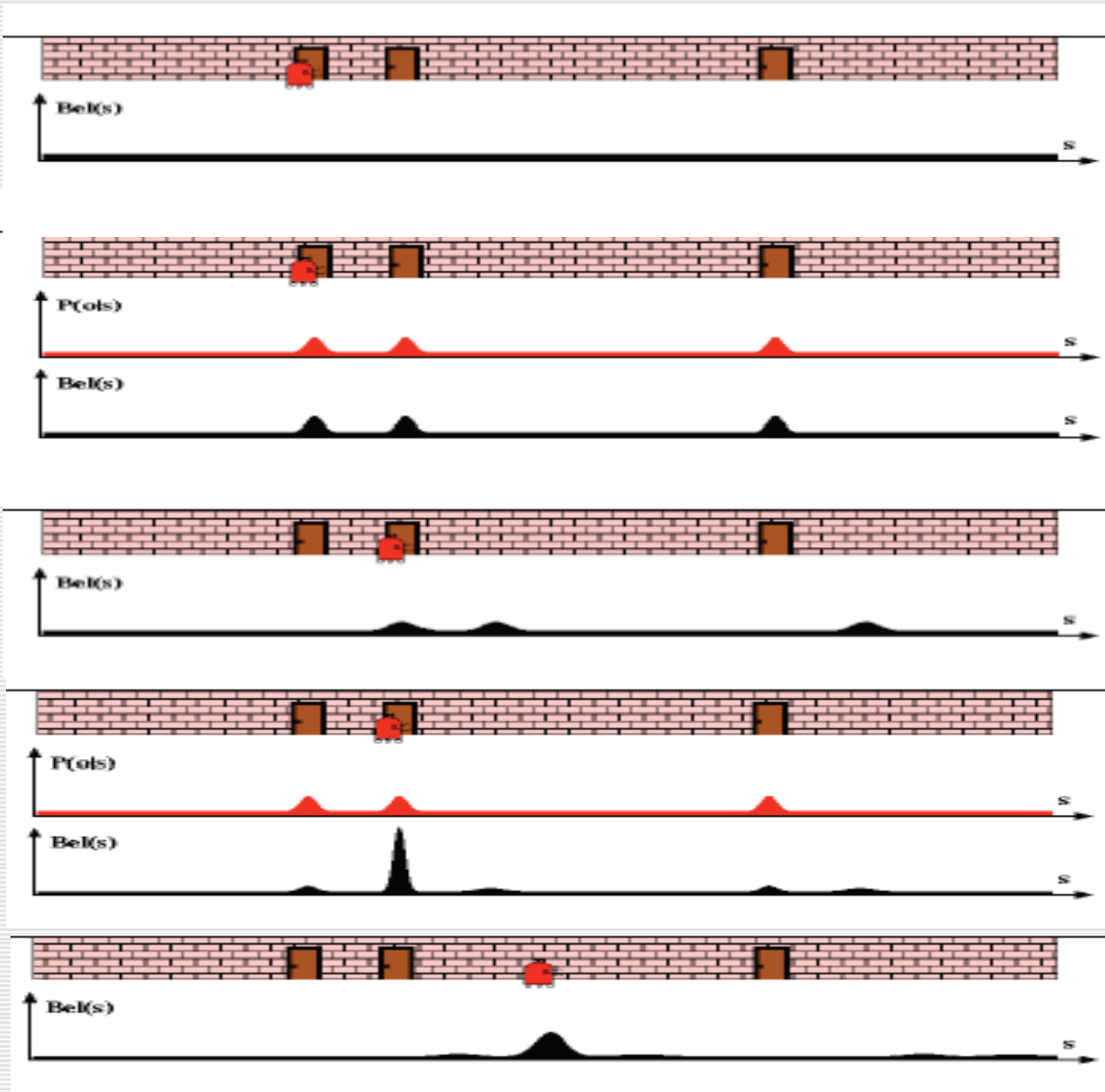
From Thrun Burgard Fox, Probabilistic Robotics, MIT Press 2006

Errori di misura...



Simmetrie...





Programma del corso:

- I manipolatori

Introduzione con **manipolatore planare a 2 e a 3 link**: cinematica diretta e inversa. Introduzione ai concetti di **grado di libertà**, **ridondanza**, **spazio di lavoro**. **Rotazioni e rototraslazioni** nello spazio. Cinematica diretta ed inversa per robot manipolatori con catena cinematica aperta. Notazione di **Denavit-Hartenberg**. Strutture principali di manipolatori: SCARA, SCORBOT, polso sferico e robot antropomorfo. Cenni ai problemi connessi con la **pianificazione di traiettorie**.

- Robotica mobile

Principali tipologie di robot mobili. Equazione cinematica dell'**uniciclo**. Vincolo di **non olonomia**. Controllo della posizione di un robot mobile. Cenni al problema di localizzazione di un robot mobile: integrazione odometrica e fusione sensoriale.

N.B. Tutti gli argomenti trattati nel corso verranno affiancati da un'attività applicativa in **ambiente virtuale Processing**, il cui apprendimento anche rientra tra gli obiettivi del corso

Testi di riferimento:

- Siciliano, Sciavicco, Villani, Oriolo.
Robotica: modellistica, pianificazione e controllo.
McGraw-Hill
- Thrun, Burgard, Fox.
Probabilistic Robotics.
The MIT Press
- **Documentazione su Processing**
- **Materiale didattico sul sito**