



# Controllo dei robot

## Introduzione al corso

Prof. Paolo Rocco ([paolo.rocco@polimi.it](mailto:paolo.rocco@polimi.it))

---

## I testi



Sito web con materiale aggiuntivo:

[home.dei.polimi.it/rocco/controlrobot](http://home.dei.polimi.it/rocco/controlrobot)

## Il robot



*Il robot è un manipolatore multifunzionale riprogrammabile, progettato per muovere materiali, parti, attrezzi o dispositivi specialistici attraverso vari movimenti programmati, per l'esecuzione di diversi compiti*

(Robot Institute of America, 1980)

I campi disciplinari coinvolti sono molteplici:

- meccanica
- elettronica
- controlli automatici
- informatica
- misure
- ...



COMAU SpA

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [3]

## Robotica avanzata e industriale



La robotica è definibile come lo studio di macchine che possano sostituire l'uomo nell'esecuzione di un compito, sia in termini di attività fisica che decisionale.

Operiamo una distinzione:

### **Robotica avanzata**

- applicazioni in ambiente ostile (spaziale, sottomarino, nucleare, militare...)
- servizio (applicazioni domestiche, assistenza medica, robotica per protesi mediche, intrattenimento, agricoltura, education, ...)
- tecnologia non ancora matura

### **Robotica industriale**

- applicazioni dei robot in ambito industriale
- tecnologia matura e affidabile

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [4]

## Automazione industriale e robotica



L'automazione industriale è l'insieme delle tecnologie rivolte ad utilizzare sistemi (meccanici, elettronici, informatici) per il controllo e la produzione nell'industria, in modo da sostituire l'operatore umano, non solo per l'esecuzione materiale delle operazioni, ma anche per l'elaborazione intelligente delle informazioni.

Distinguiamo:

- Automazione **rigida**: alti volumi di produzione di manufatti di caratteristiche costanti. Richiede elevatissimi ritmi di produzione. Scarsa o nulla possibilità di riprogrammazione.
- Automazione **programmabile**: piccoli o medi volumi di produzione di manufatti di caratteristiche variabili. Deve essere possibile riprogrammare facilmente le sequenze operative.
- Automazione **flessibile**: volumi di produzione variabili di manufatti diversi (FMS). Macchinari in grado di essere utilizzati in diverse lavorazioni con modesti cambiamenti.

**Robot  $\Rightarrow$  automazione programmabile**

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [5]

## Il robot industriale



Il robot si compone di:

**Struttura meccanica  
con attuatori e sensori**



COMAU SpA

**Unità di governo**



COMAU SpA

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [6]

## Il sistema meccanico



Il manipolatore è costituito da una serie di corpi rigidi (*link*) connessi da *giunti*

Un'estremità della catena è costituita dalla **BASE**, di norma fissata terra.

All'altra estremità è presente l'**END EFFECTOR** (pinza, strumento di lavoro).

Nel manipolatore si individua una struttura portante che garantisce il posizionamento ed un **POLSO** che conferisce destrezza, dando i gradi di libertà di orientamento all'organo terminale.



Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [7]

## Il sistema di controllo



Il sistema di controllo di un robot è un prodotto molto complesso e sofisticato, che richiede tempi di sviluppo software elevati.

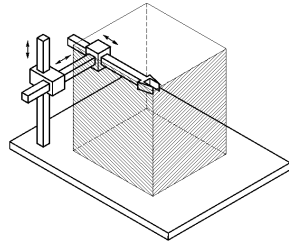
I suoi compiti principali sono i seguenti:

- Interfaccia con l'operatore (MMI)
- Pianificazione delle traiettorie
- Controllo in tempo reale del moto dei giunti
- Immagazzinamento dati
- Gestione dell'interazione con altre macchine
- Diagnostiche, gestione malfunzionamenti



Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [8]

## Strutture cinematiche

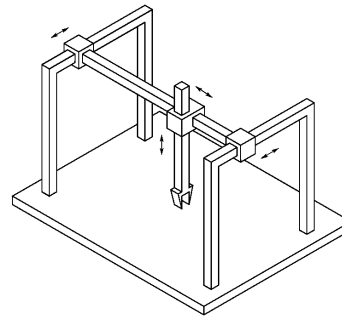


### Manipolatore cartesiano

- Tre giunti prismatici
- Ad ogni grado di libertà ai giunti corrisponde un grado di libertà cartesiano
- Molto rigido meccanicamente

### Manipolatore a portale

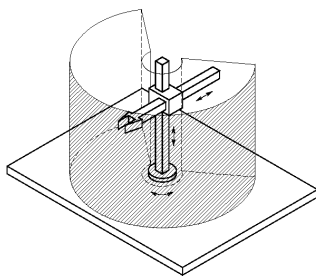
- Per la manipolazione di oggetti di peso rilevante



I disegni sono tratti dal testo:  
L.Sciavicco, B.Siciliano  
Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori (2a ed.)  
Mc Graw-Hill, 2000

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [9]

## Strutture cinematiche

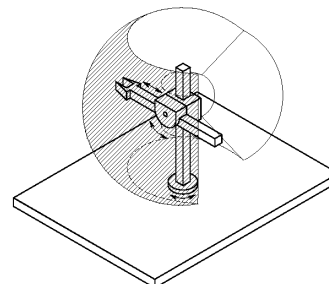


### Manipolatore cilindrico

- Un giunto rotoidale e due prismatici
- Coordinate cilindriche
- Buona rigidezza meccanica

### Manipolatore sferico

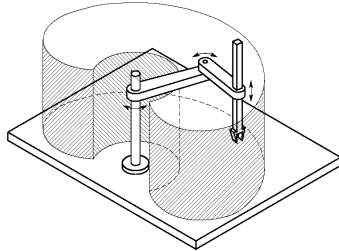
- Due giunti rotoidali ed uno prismatico
- Coordinate sferiche
- Discreta rigidezza meccanica



I disegni sono tratti dal testo:  
L.Sciavicco, B.Siciliano  
Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori (2a ed.)  
Mc Graw-Hill, 2000

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [10]

## Strutture cinematiche

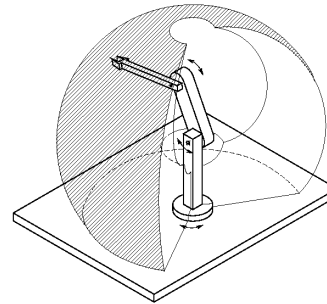


### Manipolatore SCARA

- Due giunti rotoidali e uno prismatico
- Rigido a carichi verticali e cedevole a carichi orizzontali
- “Selective Compliance Assembly Robot Arm”

### Manipolatore antropomorfo

- Tre giunti rotoidali
- Struttura destra
- Rigidezza meccanica variabile con la configurazione



I disegni sono tratti dal testo:  
L.Sciavicco, B.Siciliano  
Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori (2a ed.)  
Mc Graw-Hill, 2000

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [11]

## Esempi di robot industriali



### AdeptOne XL

- Struttura SCARA
- Quattro giunti
- Portata 12 Kg
- Ripetibilità:  $0.025 \pm 0.038$  mm

### COMAU SMART S2

- Struttura antropomorfa
  - Sei giunti
  - Portata 16 Kg
  - Ripetibilità: 0.1 mm



Gli esempi sono tratti dal testo:  
L.Sciavicco, B.Siciliano  
Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori (2a ed.)  
Mc Graw-Hill, 2000

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [12]

## Esempi di robot industriali



### ABB IRB 4400

- Struttura antropomorfa con parallelogramma
- Sei giunti
- Portata 60 Kg
- Ripetibilità:  $0.07 \pm 0.1$  mm

### Unità lineare Kuka KL 250 con robot KR 15/2

- Struttura antropomorfa montata su slitta con installazione a portale
- Sei giunti + giunto lineare
  - Portata 25 Kg
  - Ripetibilità: 0.1 mm



Gli esempi sono tratti dal testo:  
L.Sciavicco, B.Siciliano  
Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori (2a ed.)  
Mc Graw-Hill, 2000

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [13]

## Esempi di robot industriali



### Robotics Research K-1207i

- Struttura antropomorfa
- Sette giunti
- Giunto addizionale rotoidale: aumenta destrezza e consente di ripiegare

### FANUC I-21i

- Struttura antropomorfa
  - Sei giunti
  - Sensore di forza
  - Sistema di visione 3D



Gli esempi sono tratti dal testo:  
L.Sciavicco, B.Siciliano  
Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori (2a ed.)  
Mc Graw-Hill, 2000

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [14]

## Applicazioni tipiche (COMAU SpA)



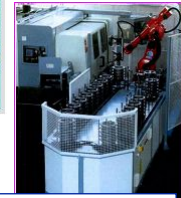
Saldatura a Punti



Saldatura ad arco



Assemblaggio



Carico - Scarico  
Macchine



Movimentazione



Sigillatura - Siliconatura



Automazione Linee  
Interesse



Lavorazione

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [15]

## Assemblaggio



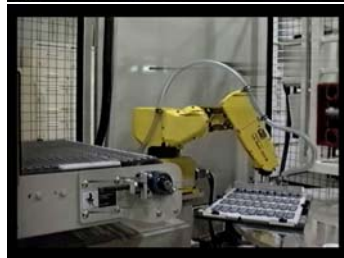
[www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com)



Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [16]



## Carico-scarico



[www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com)

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [17]

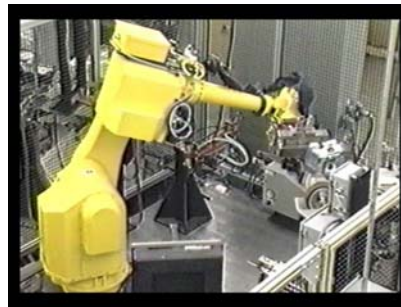
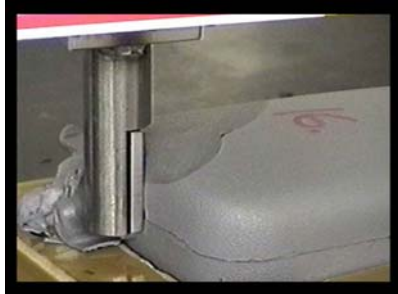
## Saldatura



[www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com)

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [18]

## Lavorazione



[www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com)

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [19]

## Verniciatura - Sigillatura



[www.fanucrobotics.com](http://www.fanucrobotics.com)

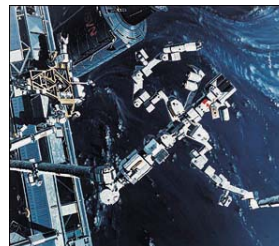
Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [20]

## Robotica di servizio



Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [21]

## Robotica spaziale



[www.space.gc.ca](http://www.space.gc.ca)

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [22]

## Robotica umanoide



[www.is.aist.go.jp/humanoid/](http://www.is.aist.go.jp/humanoid/)

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [23]

## Argomenti del corso



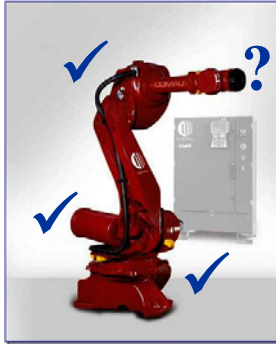
- Cinematica (diretta ed inversa)
- Cinematica differenziale e statica
- Dinamica
- Pianificazione di traiettorie
- Controllo del moto
- Controllo dell'interazione e controllo servovisivo

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [24]

## Cinematica diretta



Il problema cinematico diretto consiste nel determinare la posizione e l'orientamento dell'end effector del manipolatore, a partire dalle coordinate di giunto:

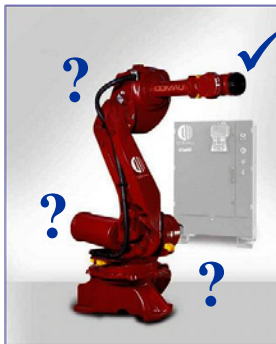


Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [25]

## Cinematica inversa



Il problema cinematico inverso consiste nel determinare le coordinate di giunto corrispondenti ad una data posizione e ad un dato orientamento dell'end effector del manipolatore:

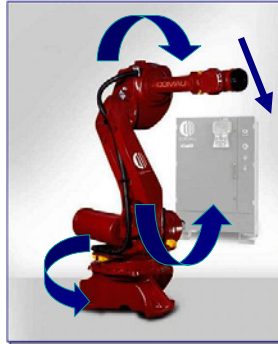


Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [26]

## Cinematica differenziale



Si mettono in relazione le velocità dei giunti con le velocità Cartesiane dell'end-effector:



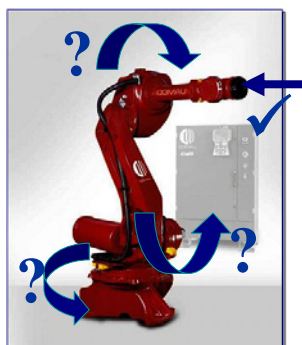
Per alcuni valori delle coordinate di giunto, la relazione può diventare singolare.

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [27]

## Statica



Lo studio della statica del manipolatore consiste nel ricavare il legame tra le forze applicate all'end effector e le coppie che tengono in equilibrio il sistema.



Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [28]

## Dinamica



Il modello dinamico del manipolatore mette in relazione le coppie applicate ai giunti ed il moto (posizioni e velocità) delle coordinate di giunto.

La conoscenza del modello dinamico del manipolatore è utile in due contesti:

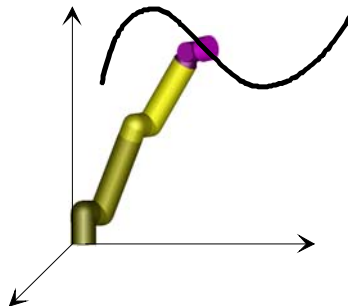
- **Simulazione**
- **Controllo**

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [29]

## Pianificazione della traiettoria



Con la pianificazione della traiettoria si intende stabilire la modalità con cui si vuole che evolva il movimento del manipolatore, da una postura iniziale ad una postura finale. Si tratta di definire sia il percorso geometrico sia la legge di moto da realizzare (ossia la dipendenza temporale di posizioni, velocità ed accelerazioni) .



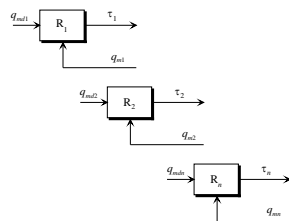
Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [30]

## Controllo del moto

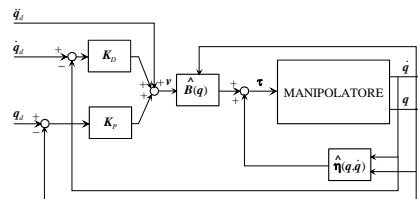


Il controllo del moto del manipolatore si può affrontare in modo:

### Decentralizzato



### Centralizzato

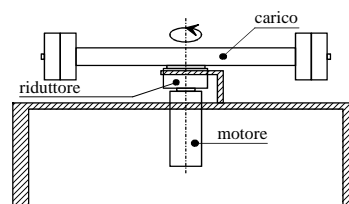


Con un controllo decentralizzato il problema si riconduce allo studio di  $n$  problemi di controllo monovariabili (controllo di servomeccanismi).

## Il servomeccanismo



Un servomeccanismo di posizione è costituito essenzialmente da un motore, un riduttore ed un carico:



Il problema di controllo si pone nei termini di governare il moto del carico, modulando opportunamente la coppia erogata dal motore.

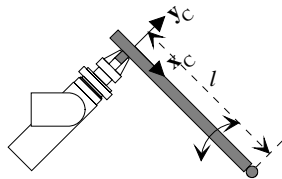
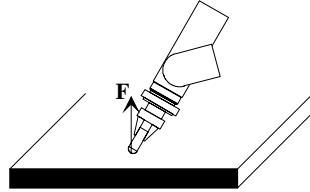
I servomeccanismi di posizione si trovano ovunque: non solo nei robot, ma anche nelle macchine utensili, macchine per lavorazione, macchine tessili, per il packaging, autoveicoli, aerei, periferiche di computer...



## Controllo dell'interazione



Si vuole che il robot interagisca con l'ambiente di lavoro esercitando le forze desiderate.

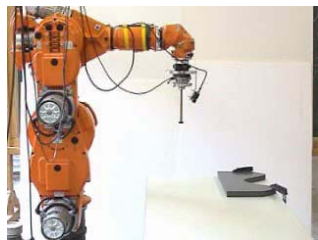


Utilizzare in queste condizioni una strategia di controllo puramente posizionale (la stessa adottata nel moto libero) può comportare problemi.

È allora opportuno adottare strategie di controllo che tengano opportunamente conto delle **forze** che si generano al contatto.

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [33]

## Controllo servovisivo



Si utilizza una telecamera montata sull'end effector del manipolatore.

Si possono avere applicazioni nell'inseguimento di contorni. Altre applicazioni si hanno nella robotica chirurgica.

Se si chiude un anello di controllo sul segnale elaborato dalla telecamera si parla propriamente di controllo servo visivo (**visual servoing**).

Controllo dei robot - Introduzione - P. Rocco [34]