



Corso di Robotica 2

Introduzione al controllo

Prof. Alessandro De Luca

DIPARTIMENTO DI INFORMATICA
E SISTEMISTICA ANTONIO RUBERTI



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Cosa vuol dire controllare un robot?

- si possono dare diversi **livelli di definizione**
 - completare con successo un **programma di lavoro**
 - eseguire correttamente una **traiettoria di moto**
 - ridurre a zero l'errore di **posizionamento**
- ➔ l'organo di controllo avrà una struttura interna **gerarchica**



- modelli, obiettivi, metodi diversi ai vari livelli, ma cooperanti



Valutazione delle prestazioni

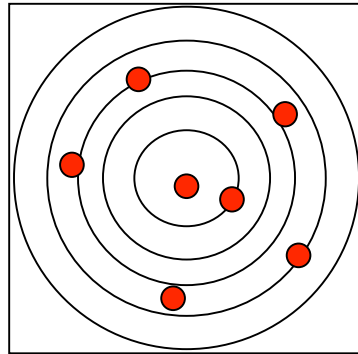
- **qualità** di esecuzione in condizioni **nominali**
 - velocità di esecuzione
 - precisione/accuratezza (statica e dinamica)
 - richieste energetiche
 - ➔ migliorabile con sforzo **modellistico**
- **robustezza** in condizioni **perturbate**
 - adattabilità
 - ripetibilità vs. disturbi, variazione di parametri, incertezze, errori di modellazione
 - ➔ migliorabile con uso generalizzato del concetto di **retroazione** (quindi con uso di **sensori**)

Posizionamento

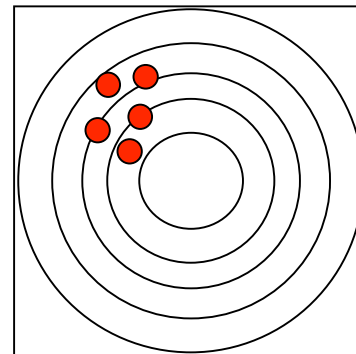
precisione e accuratezza



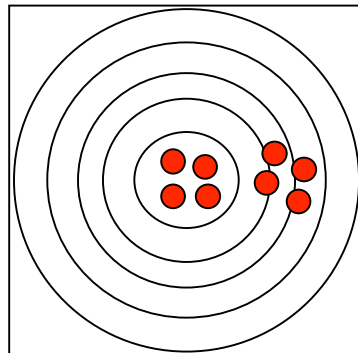
scarsa precisione
scarsa accuratezza



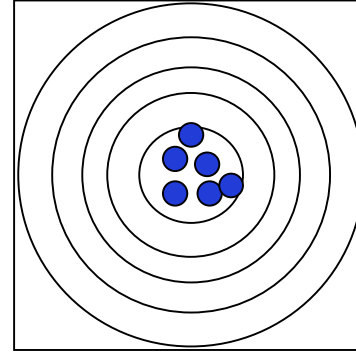
scarsa precisione
buona accuratezza



buona precisione
scarsa accuratezza



buona precisione
buona accuratezza





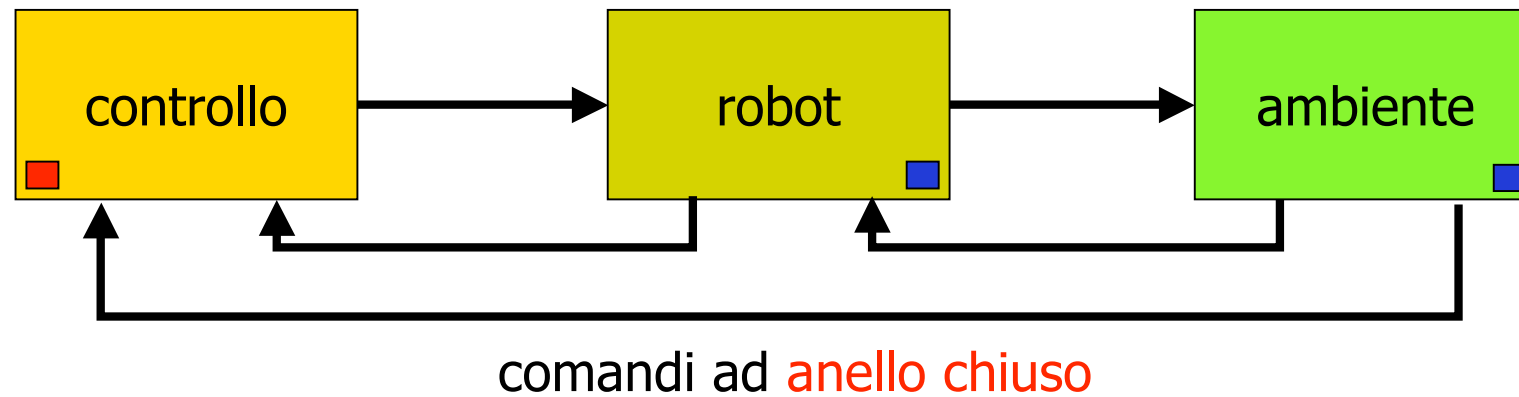
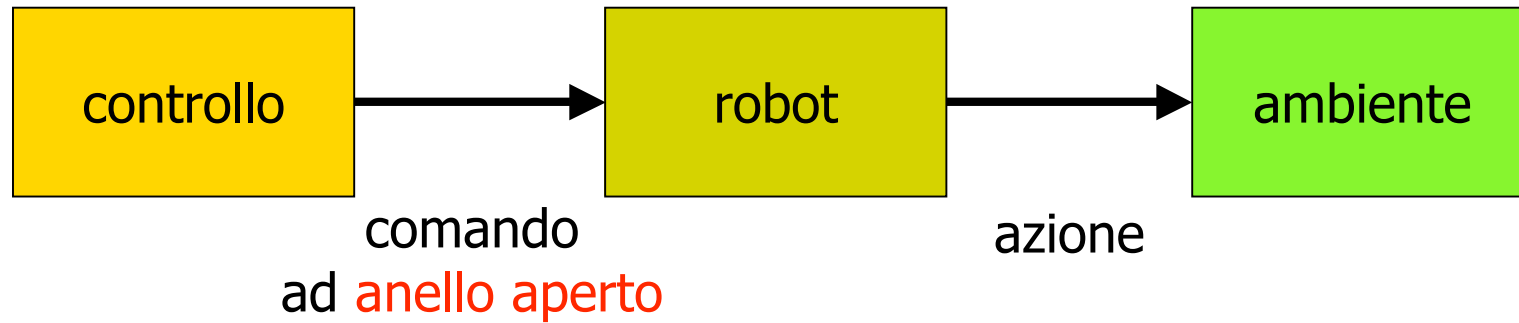
Schemi di controllo vs. incertezze

- controllo a controreazione
 - insensibilità a disturbi e a piccole variazioni parametriche
- controllo robusto
 - tollera incertezze relativamente ampie, ma di campo noto a priori
- controllo adattativo
 - migliora le prestazioni in linea, adeguandosi a incertezze di campo non noto a priori e/o a variazioni ampie (non troppo rapide)
- controllo intelligente
 - migliora prestazioni in base all'esperienza (da zero): **LEARNING**
 - sceglie autonomamente la struttura interna per ottimizzare il comportamento: **SELF-ORGANIZING**

incertezze sui valori dei parametri ➡ IDENTIFICAZIONE
... o sulla struttura del sistema ➡ ...



Schemi di principio



Limiti dei controllori di robot industriali



- dal punto di vista funzionale
 - architetture "chiuse" e non interfacciabili semplicemente ad altre strutture di calcolo
 - ➔ soprattutto per applicazioni in tempo reale

- ad alto livello
 - comandi generati ad anello aperto
 - ➔ feedback sensoriale esteroceettivo assente o molto lasco

- a livello intermedio
 - scarso uso di aspetti e modelli cinematici avanzati
 - ➔ robustezza a singolarità: risolta caso per caso
 - ➔ ridondanza rispetto a un compito: assente una gestione automatica dei gradi di libertà aggiuntivi del robot

Limiti dei controllori di robot industriali



- a basso livello (diretto)
 - limitata velocità di esecuzione ("banda passante")
 - ← struttura meccanica "pesante" ■
 - bassa precisione dinamica su traiettorie veloci
 - ← controllo "cinematico" + PID ■
 - problemi di attrito secco e giochi degli ingranaggi ■
 - elasticità nella struttura
 - ← elementi di trasmissione (cinghie, harmonic drives, lunghi alberi di trasmissione) ■
 - ← bracci leggeri ■
- richiedono l'impiego di **modelli dinamici** e **controlli** model-based
- risolti ad esempio con attuatori ad **accoppiamento diretto**

ora, **desiderata**
per una sicura
interazione
fisica
Human-Robot



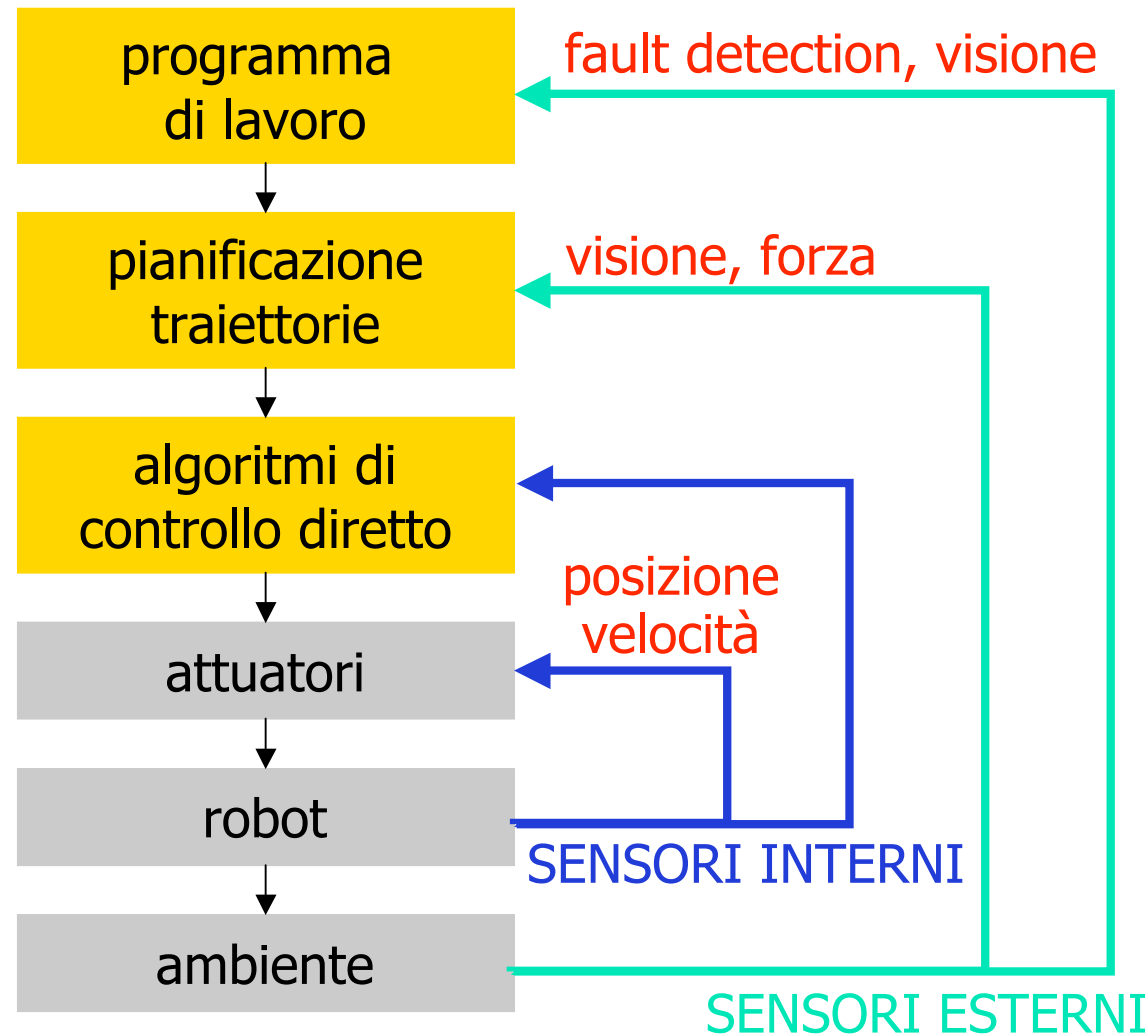
Controllori avanzati per robot

caratteristiche comuni rispetto alle prime generazioni

- approfondimento della conoscenza matematica e fisica dei vari componenti (**modellistica**)
- uso di schemi con diversi anelli di controllo attraverso livelli gerarchici (**retroazione**)
- metodologie “non convenzionali”
 - integrazione di aspetti di pianificazione e di controllo (sensor-based planning)
 - apprendimento iterativo
 - ...



Struttura funzionale organo di controllo

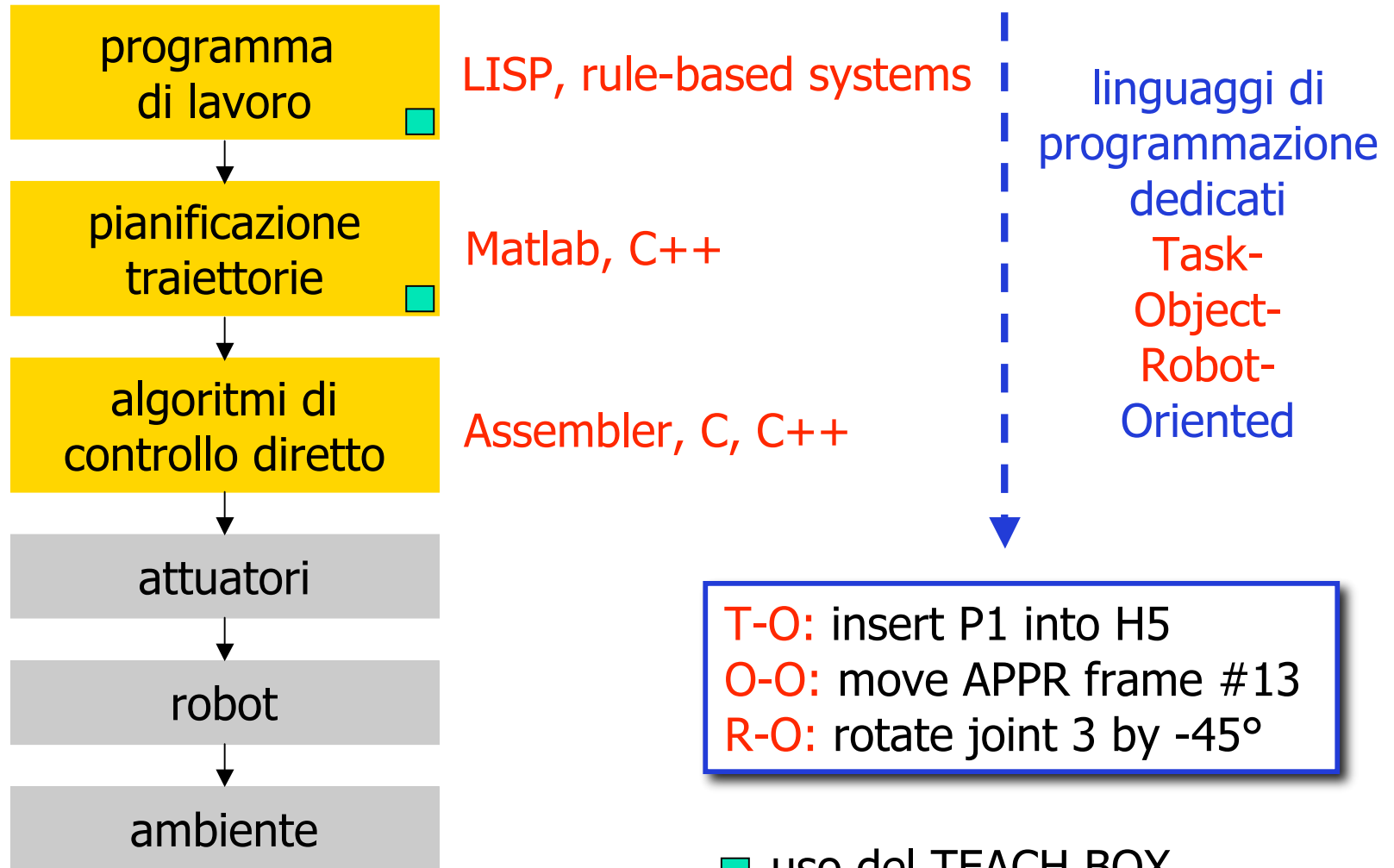


SENSORI:

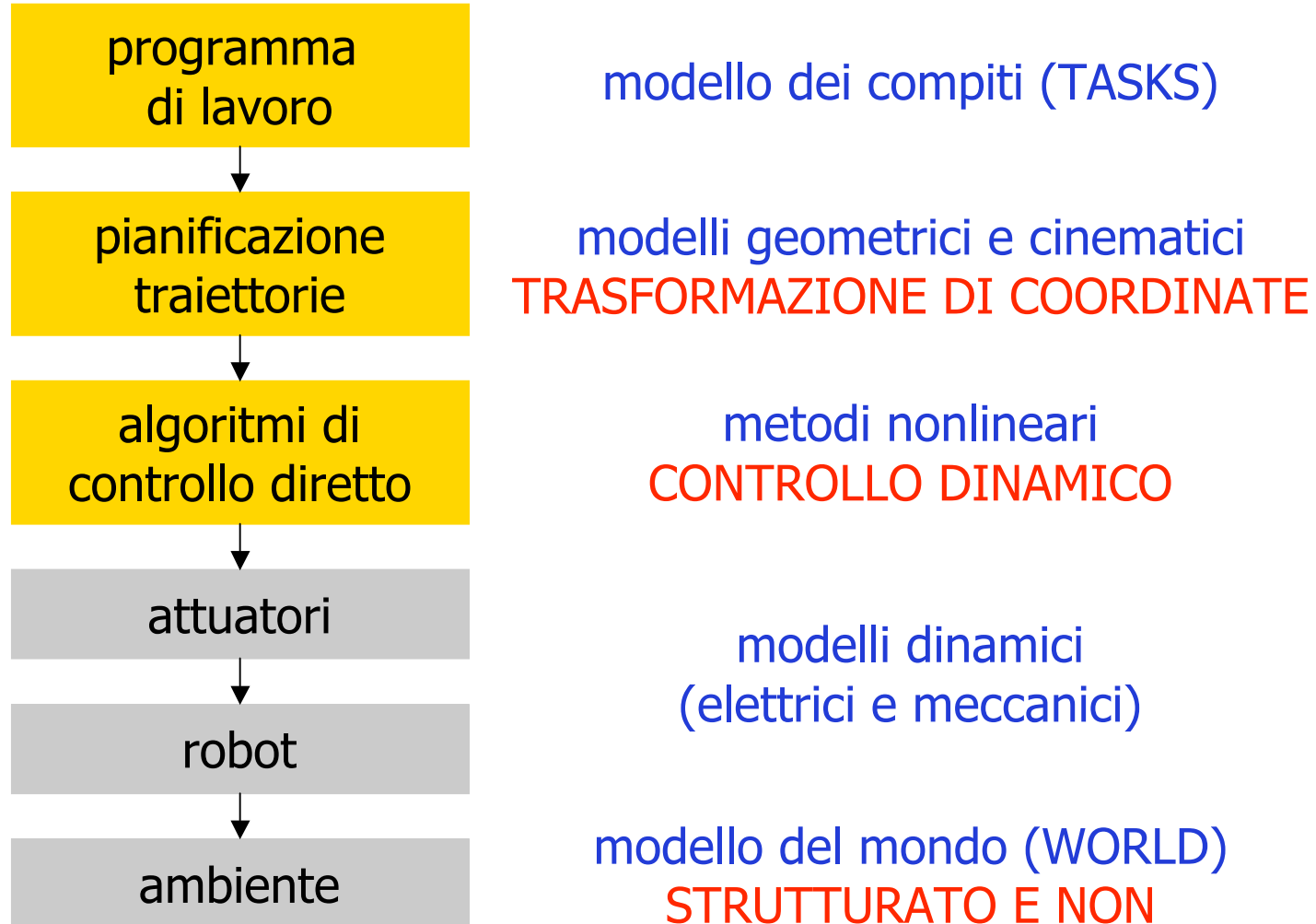
encoder ottici,
dinamo
tachimetriche,
strain gauges,
coppia ai giunti,
sensori tattili,
fotocellule,
microswitch,
range sensors,
laser,
camere CCD,
...



Struttura funzionale organo di controllo



Struttura funzionale organo di controllo





Ricapitolando...

- per **migliorare prestazioni** di controllori per robot occorre
 1. **modellistica** più completa
 2. introduzione di **feedback** in tutti i livelli delle gerarchie
- usando al livello più basso il **controllo dinamico** si ottiene
 1. **precisione** notevolmente superiore su traiettorie qualsiasi
 2. **velocità** maggiori a parità di precisione
- interazione fra **controllo, meccanica, e elettrotecnica**
 1. esistono metodi di controllo anche per **robot leggeri/cedevoli**
 2. si può sfruttare a pieno la **ridondanza**
 3. accurato **progetto meccanico** può ridurre lo sforzo di controllo (esempio: catene chiuse e struttura matrice d'inerzia)
 4. **attuatori** con prestazioni più spinte (e.g., direct drive) possono essere utilizzati con profitto

ovviamente le applicazioni devono giustificare i costi aggiuntivi
(ad es., laser cutting con accelerazioni di 10 g)



Panorama dei controllori

- problemi e metodi per robot manipolatori considerati nel corso

tipo di compito		definizione errore	spazio dei giunti	spazio cartesiano	spazio del compito
moto libero	regolazione		PD, vari PID, compensazione gravità, learning iterativo	PD con compensazione gravità	visual servoing (regolazione cinematica)
	asservimento di traiettoria		feedback linearization, dinamica inversa + PD, controllo con passività, controllo adattativo	feedback linearization	
moto in contatto			-	controllo di impedenza	controllo ibrido forza-velocità