Elementi di robotica industriale

Stefano Ferrari

Università degli Studi di Milano
ferrari@dti.unimi.it

Corso di Robotica Industriale
IFTS "Industrializzazione del Prodotto e del Processo"

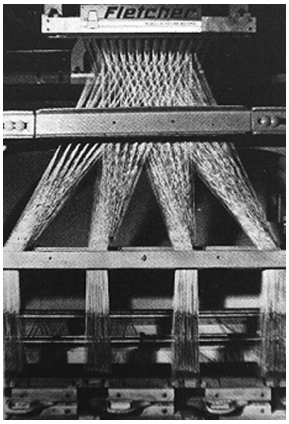
Motivazioni dell'automazione industriale

L'automazione del processo produttivo consente di:

- ridurre i costi di produzione;
- aumentare la produttività;
- incrementare la qualità del prodotto;
- eliminare i compiti faticosi, rischiosi o alienanti per un operatore umano.

Breve storia dell'automazione industriale

- Rivoluzione industriale (fine 1700): meccanizzazione e standardizzazione delle lavorazioni
- Telaio di Jacquard (1801)



Automazione industriale (2)

- Gru con pinze meccanizzata di Babbitt (1892)
- Verniciatore spray programmabile di Pollard (1938)
- Primo robot programmabile di Devol (1954)
- *Unimate*, primo robot in linea di produzione (1961)
- Robot mobile con visione, Stanford Research Institute (1968)
- Braccio robotico (con mano), Stanford Research Institute (1970)
- Sonde Viking con braccio robotico (1976)
- Automazione di linee di produzione (anni '80)
- Robot androidi, intrattenimento, assistenza medica, *special purpose* (anni '90).

Applicazioni 4D

I robot industriali trovano applicazioni per tutti i compiti che rientrano nell cosidette "4D":

- *Dull*: stupido;
- *Dirty*: sporco;
- *Difficult*: difficile;
- *Dangerous*: pericoloso.

Aree di applicazione

Le principali aree di applicazione:

- lavorazioni ad alte temperature:
  - fusione
  - stampaggio
  - forgiatura
  - trattamento termico
- saldatura (ad arco, laser, a gas);
- trattamenti con materiali tossici:
  - vernici
  - collanti
  - sigillanti
- taglio, pulitura, carico, scarico;
- taglio laser, waterjet;
- assemblaggio, imballaggio;
- misura, ispezione, prove.

Tipi di robot industriali

- Robot di saldatura:
  - precisione,
  - ripetibilità,
  - robustezza (la pinza di saldatura può essere pesante);
  - agilità di articolazione (i punti di saldatura possono essere difficili da raggiungere);
  - altro: più punti di saldatura, adattamento al pezzo da lavorare.
- Robot di montaggio:
  - tipo di movimento;
  - volume di lavoro;
  - precisione e ripetibilità;
  - capacità di afferrare, spostare e rilasciare il pezzo.

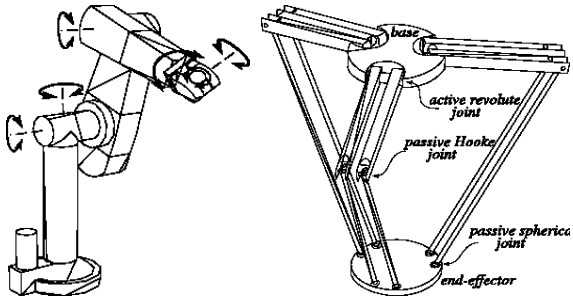
Tipi di robot industriali (2)

- Robot di manipolazione:
  - carico sollevabile,
  - afferraggio dei pezzi,
  - velocità e accelerazione;
  - precisione (assenza di vibrazioni).
- Robot di trasporto:
  - attuatori di movimento;
  - autonomia (di operabilità);
  - autonomia (di movimento).
- Robot teleoperati:
  - (parziale) autonomia decisionale;
  - coerenza con i movimenti dell'operatore.

Meccanica dei robot

I robot hanno una struttura molto variegata, ma è possibile individuare alcuni componenti generalmente presenti:

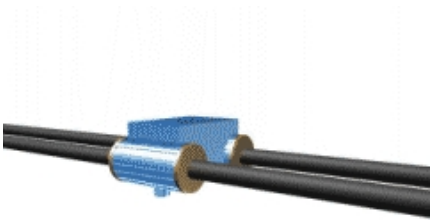
- struttura portante: telaio fisso o supporto mobile;
- catena cinematica: generalmente aperta;
  - bracci: aste rigide;
  - giunti: articolazioni meccaniche;
  - estremità: *end effector*, pinza, attrezzo;



Giunti

I giunti connettono le parti rigide e si possono classificare per il tipo di movimento che permettono:

- rotoidali (R): moto rotatorio attorno ad un solo asse;
- prismatici (P): moto traslatorio lungo un solo asse;
- elicoidali: moto roto-traslatorio lungo un'elica (vite);
- cilindrici: moto roto-traslatorio attorno e lungo un asse;
- sferici (S): moto rotatorio attorno ad un punto.



Gradi di libertà

I gradi di libertà sono i movimenti concessi:

- giunti rotoidali: 1 grado di libertà;
- giunti prismatici: 1 grado di libertà;
- giunti elicoidali: 1 grado di libertà;
- giunti cilindrici: 2 gradi di libertà;
- giunti sferici: 3 gradi di libertà.

I gradi di libertà di un robot sono dati dalla combinazione dei gradi di libertà dei giunti:

- il modo in cui sono assemblati i componenti influisce sui gradi di libertà del sistema;
- al massimo, i gradi di libertà del sistema sono pari alla somma dei gradi di libertà dei componenti.

Nota: ostacoli e vincoli strutturali possono diminuire localmente i gradi di libertà del sistema.

Gradi di libertà (2)

Un oggetto nello spazio tridimensionale (3D) è individuato da:

- una posizione (3 coordinate $\rightarrow$ 3 gradi di libertà);
- un orientamento (3 angoli $\rightarrow$ 3 gradi di libertà).

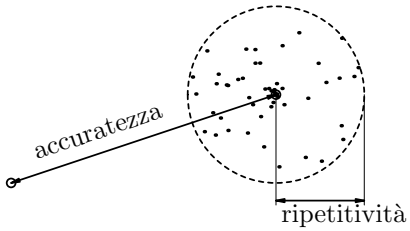
Per portare un attrezzo in ogni punto dello spazio di lavoro, con ogni possibile orientamento, servono 6 gradi di libertà.

Nota: Poiché ostacoli e vincoli strutturali possono diminuire localmente i gradi di libertà del sistema, gradi di libertà ridondanti possono essere usati per superare tali vincoli.

Precisione

La precisione di posizionamento è data da:

- Ripetitività:
  - precisione con cui si torna in un determinato punto;
  - si valuta come raggio della sfera dei punti raggiunti;
  - è influenzata dagli errori casuali;
- Accuratezza:
  - precisione con cui si raggiunge il punto richiesto;
  - si valuta come la distanza tra il punto richiesto e la media dei punti raggiunti;
  - è influenzata dagli errori sistematici.



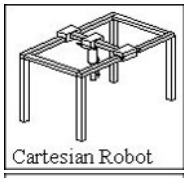
Strutture di robot

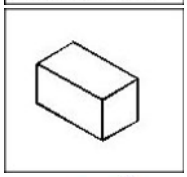
I robot possono essere classificati in base alla loro struttura:

- robot seriali:
  - cartesiani;
  - cilindrici;
  - sferici (o polari);
  - articolati;
  - SCARA;
- robot paralleli.

Robot cartesiani (PPP)

- Hanno tre giunti prismatici che operano su assi ortogonali.
- Lo spazio di lavoro è un parallelepipedo.





PRO

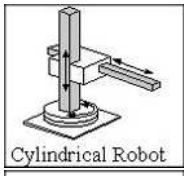
- semplicità;
- rigidità strutturale;

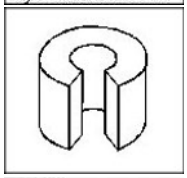
CONTRO

- spazio di lavoro ristretto rispetto al volume del robot;
- velocità generalmente bassa;
- giunti prismatici poco efficienti;
- incapacità di raggiungere la parte inferiore del pezzo.

Robot cilindrici (RPP)

- Rotazione lungo l'asse verticale e spostamento lungo il piano veticale.
- Lo spazio di lavoro è un cilindro (o, meglio, una corona cilindrica).





PRO

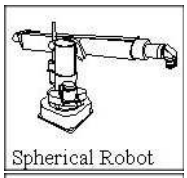
- semplicità;
- giunto di rotazione più efficiente;
- può raggiungere cavità;

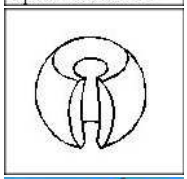
CONTRO

- spazio di lavoro ristretto e ostruito dal robot stesso;
- la precisione dipende dal raggio;
- giunti prismatici poco efficienti.

Robot sferici (RRP)

- Detti anche polari.
- Rotazione lungo l'asse verticale e quello orizzontale e spostamento radiale.
- Lo spazio di lavoro è una sfera (all'incirca).





PRO

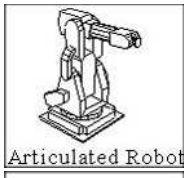
- semplicità;
- vasto volume rispetto a quello del robot;
- può raggiungere cavità;

CONTRO

- spazio di lavoro ristretto e ostruito dal robot stesso;
- minor precisione rispetto a modelli cartesiani e cilindrici;
- la precisione dipende dal raggio.

Robot articolati (RRR)

- Detti anche angolari.
- Rotazione lungo tre assi ortogonali.
- Lo spazio di lavoro è una sfera (all'incirca).



PRO

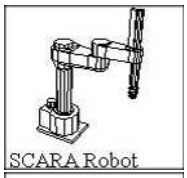
- flessibilità e agilità;
- vasto volume di lavoro;
- giunti rotoidali:
  - protetti da polvere;
  - tipicamente motori elettrici;
- alta velocità di lavoro;

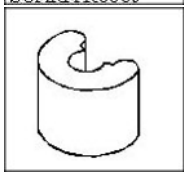
CONTRO

- modello complesso;
- difficoltà di esecuzione di movimenti lineari;
- struttura poco rigida verso gli estremi.

Robot SCARA (PRR)

- Selective Compliance Assembly Robot Arm.
- Traslazione verticale, e poi due rotazioni verticali.
- La traslazione verticale è tipica delle operazioni di assemblaggio.





PRO

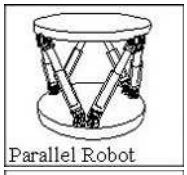
- i motori possono stare nella base (agilità);
- disaccoppiamento delle operazioni di movimento orizzontale e verticale

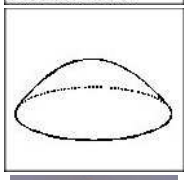
CONTRO

- modello abbastanza semplice.

Robot paralleli

- Catene chiuse che muovono una piattaforma.
- Inizialmente usato per i simulatori di volo.
- Tipicamente tripode o esapode.





PRO

- precisione e velocità;
- molte architetture possibili;

CONTRO

- modello complesso.

Effettore

L'estremità del braccio è dotato di un componente detto end effector.

- L'effettore è spesso collegato al braccio tramite un giunto detto polso.
- Il polso può orientare l'estremità (uno, due o tre gradi di libertà).
- I più diffusi attrezzi sono:
  - pinza da afferraggio:
    - meccanica;
    - depressione;
    - magnetica;
  - pinza da saldatura;
  - pistola da verniciatura.

Sensori

Possono essere:

- interni (o propriocentrici):
  - dati cinematici (posizione, velocità, accelerazione);
  - dati dinamici (forze, pressioni);
  - operativi (pressione fluidi, stato on/off);
- esterni (o esterocentrici):
  - dati ambientali (luce, temperatura);
  - oggetti (distanze, pesi).

Realizzano:

- trasduzione;
- elaborazione:
  - filtraggio;
  - fusione;
  - intelligenza.

Sensori (2)

- rotazione:
  - encoder: codifica l'angolo di rotazione come numero di transizioni luce/buio causate da un disco forato solidale ad una delle metà del giunto;
  - resolver: misura dello sfasamento elettromagnetico di due avvolgimenti;
  - potenziometrici, capacitivi, induttivi;
- posizione:
  - interrutori;
  - ultrasuoni, infrarossi, laser;
- prossimità:
  - ottico: confronto della luce riflessa rispetto a valori di taratura;
  - ultrasuoni, infrarossi, laser: misura deltempo di volo;
  - magnetici: misura di correnti parassite;

Sensori (3)

- forza:
  - estensimetri elettrici: misurano la variazione nelle caratteristiche elettriche date dalle deformazioniaudio di un micro-circuito;
  - capacitivi, potenziometrici, induttivi;
  - piezoelettrici;
- tattili:
  - contatto;
  - strisciamento;
- visione:
  - luce/colore;
  - telecamera: necessita di un dispositivo di elaborazione aggiuntivo;
- audio:
  - suono (microfono);
  - voce: necessita di un dispositivo di elaborazione aggiuntivo.

Attuatori

Realizzano il movimento e l'interazione con l'ambiente:

- agendo direttamente
- operando la trasformazione del movimento (servomotore).

Possono essere:

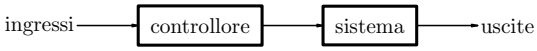
- elettromagnetici:
  - motori a corrente continua:
  - motori a corrente alternata:
  - motori passo a passo (*step motor*);
- idraulici;
- pneumatici;
- meccanici.

In senso lato, possono anche essere audio/video.

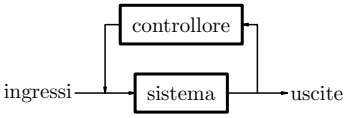
Controllo

Gestisce l'attività degli attuatori, anche in funzione delle informazioni collezionate dai sensori.
Può essere:

- anello aperto: si suppone di conoscere la legge con cui varia la grandezza di riferimento in funzione degli ingressi;
- retroazione (*feed-back*, o anello chiuso);
  - regolatori (la grandezza di riferimento è costante);
  - proporzionale, integrativo e derivativo (PID).



anello aperto



anello chiuso

Sistemi di riferimento

Un'attività importante della programmazione di un sistema di controllo riguarda il movimento dei componenti meccanici.
Il posizionamento dei componenti può essere espresso in diversi sistemi di riferimento:

- coordinate universali
  - relative ad un sistema di riferimento esterno
- coordinate relative
  - relative al sistema di riferimento locale di un componente
- coordinate macchina
  - espresse in termini di posizionamento dei giunti che compongono il sistema

Inoltre, le coordinate possono essere:

- assolute;
- incrementali.

Programmazione

Esistono due metodi per la programmazione di robot industriali:

- off-line: simulazione al computer (cad);
  - richiede un modello dell'ambiente di lavoro e un simulatore per testare i programmi;
  - si può lavorare senza mettere rischi per macchine e operatori;
- on-line: sul luogo di lavoro;
  - si deve fermare la produzione;
  - il movimento del robot è generalmente più lento della simulazione.

Generalmente, si adotta un approccio ibrido:

- logica (strutture di controllo, comunicazione, calcolo): meglio svilupparlo off-line;
- posizionamenti: meglio regolarlo on-line.

Programmazione on-line

La programmazione on-line riguarda essenzialmente la specifica delle traiettorie.
Viene tipicamente realizzata in due modalità:

- punto a punto:
  - il programmatore posiziona (e orienta) l'effettore in una sequenza di punti significativi;
  - il robot memorizza tali punti (coordinate macchina);
  - l'operatore può specificare la legge di interpolazione, la tempistica, la velocità e l'accelerazione.
- traiettoria:
  - l'operatore guida l'effettore lungo la traiettoria;
  - il robot memorizza una fitta serie di punti;
  - l'operatore può memorizzare anche la dinamica.

Programmazione off-line

La programmazione off-line viene realizzata senza l'accesso fisico al robot.

- linguaggio di programmazione:
  - generalmente è testuale;
  - si vanno diffondendo linguaggi visuali (flusso di controllo come grafo, i nodi sono strutture di controllo e procedure, rappresentate da blocchi).
- simulatore:
  - geometria, meccanica statica e dinamica;
  - eventi esterni e interni;
  - eventuale visualizzazione.

Peculiarità della programmazione robotica

La programmazione di un sistema robotico presenta alcune caratteristiche peculiari:

- dipendenza da eventi esterni:
  - asincroni;
  - da gestire in *real-time* (entro un certo tempo);
- elevato parallelismo:
  - compiti (e.g., i sensori vanno letti anche quando gli attuatori sono in movimento);
  - dispositivi (e.g., diversi attuatori si possono muovere contemporaneamente).

Metodi evoluti di programmazione

Uno dei campi di ricerca nell'ambito della robotica è la programmazione per esempi (*Robot Programming by Demonstration*):

- l'operatore mostra una soluzione operando in prima persona:
  - il sistema robotico registra le modifiche ambientali apportate dall'operatore (*start* e *goal*);
  - eventualmente, l'operazione viene ripetuta con scenari differenti;
  - il robot individua le regole alla base delle azioni dell'operatore (generalizzazione);
  - le regole vengono tradotte in programma.
- esempi di problema e soluzione:
  - al robot vengono mostrate situazioni di lavoro prima e dopo l'intervento;
  - il robot individua le regole che caratterizzano l'intervento (generalizzazione);
  - le regole vengono tradotte in programma.

Problemi che la programmazione deve affrontare

La programmazione robotica di base deve considerare problemi legati a:

- geometria:
  - alcune configurazioni dei giunti sono impossibili (o pericolose);
- statica:
  - alcune situazioni non hanno un'unica soluzione;
  - i limiti meccanici del sistema vanno considerati;
  - accuratezza in funzione della posizione nello spazio di lavoro;
- dinamica:
  - inerzia (accelerazione e decelerazione in funzione del carico);
  - eventuale movimento del carico per oscillazione.

Posizionamento

Il posizionamento dell'effettore può essere descritto tramite:

- coordinate macchina (spazio dei giunti);
- coordinate universali (spazio cartesiano).

Si dice cinematica diretta la funzione che trasforma le coordinate macchina in coordinate universali.

Si dice cinematica inversa la funzione che trasforma le coordinate universali in coordinate macchina.

Bibliografia

- `http://www.ifr.org/`, International Federation of Robotics.
- A. Rovetta, *Robotica*, Ed. Hoepli, 2005.